

Titre: Modélisation en temps réel des écoulements dans le système
Title: hydroélectrique du complexe Isle-Maligne

Auteur: Isabelle Doré
Author:

Date: 1998

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Doré, I. (1998). Modélisation en temps réel des écoulements dans le système
Citation: hydroélectrique du complexe Isle-Maligne [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6892/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie:
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/6892/>

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**MODÉLISATION EN TEMPS RÉEL DES ÉCOULEMENTS
DANS LE SYSTÈME HYDROÉLECTRIQUE
DU COMPLEXE ISLE-MALIGNE**

ISABELLE DORÉ

**DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)
(GÉNIE CIVIL)**

JUILLET 1998

© Isabelle Doré, 1998.



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38675-9

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

**MODÉLISATION EN TEMPS RÉEL DES ÉCOULEMENTS
DANS LE SYSTÈME HYDROÉLECTRIQUE
DU COMPLEXE ISLE-MALIGNE**

Présenté par: DORÉ Isabelle

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. KAHAWITA René, Ph.D., président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

Mme RÉMILLARD Louise, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier la compagnie Alcan et, particulièrement, le Groupe Ressources Hydriques de m'avoir permis, grâce à un soutien technique, financier et la grande confiance qu'ils m'ont accordée, de réaliser une maîtrise dans ce domaine. L'écriture de ce mémoire n'aurait pas été possible sans les encouragements soutenus et les nombreux conseils prodigués par Mme Louise Rémillard.

Je remercie également mon directeur de recherche, M. Claude Marche, pour toute l'aide qu'il m'a apportée pendant la durée du projet.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. Michel Tremblay ; ses commentaires et explications ont répondu à plusieurs de mes interrogations.

Les encouragements perpétuels de mes amis et de ma famille ont facilité mon travail et la rédaction de ce rapport. Merci, Marc, pour ton aide et ta patience...

RÉSUMÉ

La compagnie Alcan, installée au Saguenay - Lac Saint-Jean, exploite 6 centrales hydroélectriques dont celles d'Isle-Maligne, Shipshaw et Chute-à-Caron. La centrale d'Isle-Maligne est située sur la rivière Grande Décharge, principal exutoire du lac Saint-Jean, et les centrales Shipshaw et Chute-à-Caron se retrouvent plus en aval, sur la rivière Saguenay. À quelques kilomètres en aval de l'entrée de la Grande Décharge se trouve un rétrécissement de la section d'écoulement que l'on appelle communément la gorge. La gorge crée des pertes de charge importantes, pouvant aller jusqu'à quelques mètres. Le débit de la Grande Décharge est contrôlé en aval par la centrale et les déversoirs et, en amont, la gorge influence le débit maximal sortant du lac Saint-Jean. Cette dynamique complexe rend difficile la prévision du niveau de la Grande Décharge et le calcul du débit pouvant être évacué par les déversoirs devient aussi problématique.

L'objectif de cette étude est de développer un outil qui facilite ou améliore la gestion au complexe Isle-Maligne en permettant de prévoir, en temps réel, le niveau dans la Grande Décharge. Ainsi, les débits déversés seront mieux estimés et les mouvements de vannes optimisés.

Les données hydrométriques horaires, sur la période printanière des années 1994 à 1997, ont servi à analyser le comportement de la Grande Décharge. Le logiciel de simulation hydrodynamique bidimensionnel TASE/SWAN Plus a été utilisé pour développer le modèle de la Grande Décharge. Un critère important dans la construction du modèle était de minimiser le temps de calcul, tout en assurant la fiabilité des résultats. Le modèle modifie les paramètres reliés au calcul du coefficient de Manning en tenant compte des trois principaux cas observables : les cas de fermeture de vannes, les cas d'ouverture au moment où les pertes de charge dans la

Grande Décharge sont importantes et un autre cas quand les pertes de charge sont faibles.

Le modèle de la Grande Décharge permet d'estimer, sur un horizon pouvant aller à 72 heures, l'évolution du niveau dans la Grande Décharge après des changements opérationnels au complexe Isle-Maligne. Dans la plupart des cas, la différence notée sur les niveaux et débits simulés, par rapport aux valeurs observées, a un effet négligeable sur la prévision des niveaux dans le réservoir de la rivière Saguenay en amont des centrales Shipshaw et Chute-à-Caron.

Les résultats obtenus démontrent que la modélisation hydrodynamique, à des fins de gestion hydrique en temps réel, peut s'avérer un outil de choix en permettant la prévision du comportement d'un cours d'eau où des opérations de régulation sont effectuées.

ABSTRACT

The Alcan company, based in Saguenay – Lac-Saint-Jean, operates six hydroelectric powerplants, including Isle-Maligne, Shipshaw and Chute-à-Caron. The Isle-Maligne powerplant is located on the main outlet of the lake Saint-Jean, the Grande Décharge river, the Shipshaw and Chute-à-Caron powerplants are downstream on the Saguenay river. Few kilometres downstream of the mouth of the Grande Décharge, the flow section narrows into a gorge. This gorge generates significant head losses that could reach few metres. The discharge of the Grande Décharge is controlled by the Isle-Maligne powerplant and spillways downstream, while the gorge influences the maximum outflow from lake Saint-Jean. The complexity of this hydraulic system makes it difficult to forecast the Grande Décharge level, which, in turn, renders the calculation of the flow that may be evacuated from Isle-Maligne problematic.

The objective of this study is to develop a tool that would facilitate or improve the operation of the Isle-Maligne complex, by allowing the prediction in real-time of the levels in Grande Décharge. The excess (spilled) flow may thus be better estimated at Isle-Maligne and the gate operation optimized.

The response of the Grande Décharge has been analyzed using hourly hydrometric data gathered during the spring seasons of 1994 to 1997. The two dimensional hydrodynamic simulation software package TASE/SWAN Plus has been used to model the Grande Décharge. One important criteria in developing the model was to minimize the calculation time, while providing reliable results. The model modifies the parameters related to the estimate of the Manning coefficient based on three main situations that may be verified: for gate closures, for gate openings, when head losses in Grand Décharge are significant, and a final case when the head losses are low.

The Grande Décharge model allow to estimate for a time horizon of up to 72 hours, the évolution of the Grande Décharge level following operational changes at Isle-Maligne. In most cases, the error in the water surface elevations and discharges simulated is negligible with respect to predicting the levels in the reservoir of the Saguenay river upstream of the powerplant Shipshaw and Chute-à-Caron.

The results obtained show that the hydrodynamic simulation of a river reach is a promising tool for the real time operation of a system, by allowing prediction of the behavior of a river subject to stream regulation operations.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| REMERCIEMENTS..... | iv |
| RÉSUMÉ..... | v |
| ABSTRACT..... | vii |
| TABLE DES MATIÈRES..... | ix |
| LISTE DES FIGURES..... | xii |
| LISTE DES ANNEXES..... | xiii |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | xiv |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS..... | 4 |
| 1.1 Problématique..... | 4 |
| 1.2 Objectifs spécifiques du projet..... | 8 |
| 1.3 Réalisation du projet..... | 9 |
| ANALYSE DES DONNÉES HYDROMÉTRIQUES..... | 10 |
| 2.1 Introduction..... | 10 |
| 2.2 Informations disponibles..... | 11 |
| 2.2.1 Données hydrométriques et d'opération..... | 11 |
| 2.2.2 Courbes des pertes de charge utilisées actuellement..... | 12 |
| 2.3 Mode de gestion..... | 13 |
| 2.3.1 Gestion de la crue printanière..... | 13 |
| 2.3.2 Gestion du lac Saint-Jean..... | 13 |
| 2.4 Comportement dynamique de la Grande Décharge..... | 14 |
| 2.5 Analyse des pertes de charge dans la Grande Décharge..... | 20 |
| 2.5.1 Variation de la perte de charge dans la Grande Décharge..... | 20 |
| 2.5.2 Localisation des pertes de charge..... | 21 |
| 2.5.2.1 Pertes de charge dans la gorge..... | 22 |
| 2.5.2.2 Pertes de charge dans le corridor menant à la centrale..... | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.3 Estimation des pertes de charge dans la Grande Décharge | 24 |
| 2.5.3.1 Perte de charge en fonction du débit évacué | 24 |
| 2.5.3.2 Influence des variables niveau et débit sur la perte de charge | 26 |
| 2.5.3.3 Influence du régime d'écoulement sur la perte de charge | 28 |
| MODÈLE D'ÉCOULEMENT | 31 |
| 3.1 Logiciels de simulation hydrodynamique | 31 |
| 3.1.1 Le modèle HEC-2 | 31 |
| 3.1.2 Le modèle DAMBRK | 31 |
| 3.1.3 Le logiciel FESWMS | 32 |
| 3.1.4 Le logiciel HIVEL2D | 32 |
| 3.1.5 Le logiciel TELEMACH2D | 32 |
| 3.1.6 Le logiciel TASE/SWAN Plus | 33 |
| 3.1.7 Simulateur de rivière en temps réel | 33 |
| 3.2 Particularité de la Grande Décharge | 36 |
| 3.3 Choix du modèle | 38 |
| 3.4 Présentation du logiciel TASE/SWAN Plus | 38 |
| 3.5 Composition du modèle numérique | 40 |
| 3.5.1 Caractéristiques physiques | 40 |
| 3.5.2 Conditions aux frontières | 40 |
| 3.5.3 Conditions initiales | 41 |
| 3.6 Simulateur de la Grande Décharge | 41 |
| MODÉLISATION | 42 |
| 4.1 Construction du modèle de la Grande Décharge | 42 |
| 4.1.1 Composition de la grille | 42 |
| 4.1.2 Bathymétrie | 44 |
| 4.1.3 Conditions frontières et conditions initiales | 44 |
| 4.2 Calibrage du modèle de la Grande Décharge | 46 |
| 4.2.1 Ajustement de la bathymétrie | 47 |
| 4.2.2 Calibrage des événements de déversement | 48 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 4.3 | Modélisation du Manning..... | 50 |
| 4.3.1 | Découpage des séries de données..... | 50 |
| 4.3.2 | Présentation des modèles d'estimation du coefficient de Manning..... | 53 |
| 4.3.2.1 | Cas de fermeture..... | 53 |
| 4.3.2.2 | Cas d'ouverture, avec perte de charge importante (>1.5 m)..... | 53 |
| 4.3.2.3 | Cas d'ouverture, avec perte de charge faible (<1.5 m)..... | 54 |
| 4.4 | Interface modèle-usager | 55 |
| | PRÉSENTATION DES RÉSULTATS..... | 56 |
| 5.1 | Présentation des cas validés | 56 |
| 5.1.1 | Validation des cas de fermeture..... | 57 |
| 5.1.2 | Validation des cas d'ouverture, quand la perte de charge est importante ... | 59 |
| 5.1.3 | Validation des cas d'ouverture, quand la perte de charge est faible..... | 61 |
| 5.2 | Appréciation générale..... | 63 |
| 5.2.2 | Calcul du débit simulé | 65 |
| | CONCLUSION..... | 67 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 70 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Système hydroélectrique Alcan | 4 |
| Figure 1.2 : Schéma du site..... | 6 |
| Figure 2.5 : Démonstration du contrôle de la gorge..... | 19 |
| Figure 2.6 : Démonstration du contrôle de la gorge - Volume | 19 |
| Figure 2.7 : Pertes de charge - Grande Décharge..... | 21 |
| Figure 2.8 : Perte de charge dans la gorge de la Grande Décharge | 22 |
| Figure 2.9: Perte de charge dans le corridor menant à la centrale Isle-Maligne | 23 |
| Figure 2.9 b: Perte de charge dans le corridor en fonction du débit | 24 |
| Figure 2.10 : Estimation du niveau en amont de la centrale à partir des courbes..... | 25 |
| Figure 4.1 : Présentation du maillage du modèle de la Grande Décharge | 43 |
| Figure 4.2 : Représentation du profil de la bathymétrie de la Grande Décharge..... | 48 |
| Figure 4.3 : Calibrage du cas de déversement du printemps 1995 | 49 |
| Figure 4.4 : Perte de charge - Manning..... | 51 |
| Figure 4.5 : Manning – Cas d’ouverture | 52 |
| Figure 4.6 : Manning – Cas de fermeture | 52 |
| Figure 5.1 : Validation cas #6 | 58 |
| Figure 5.2 : Validation cas #12 | 58 |
| Figure 5.3 : Validation cas #1 | 60 |
| Figure 5.4 : Validation cas #11 | 60 |
| Figure 5.5 : Validation cas #3 | 62 |
| Figure 5.6 : Validation cas #13 | 62 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|------------|
| ANNEXE I : Localisation des jauges..... | 73 |
| ANNEXE II : Courbes Alcan et échantillons | 75 |
| ANNEXE III : Résultats calibrage | 79 |
| ANNEXE IV : Cas d'ouverture et de fermeture | 91 |
| ANNEXE V : Cas validés | 106 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| Abréviations | Description |
|---------------------|---|
| Bief amont mes. | Bief amont mesuré |
| Bief amont sim. | Bief amont simulé |
| Cd | Coefficient de débit |
| Cte | Constante |
| Cw | Coefficient de la force du vent |
| DAMBRK | Dambreak Flood Forecasting Model |
| Dh | Perte de charge dans la grande décharge |
| G | Accélération gravitationnelle |
| H | Profondeur d'eau |
| h_b | Hauteur du seuil |
| HEC | Hydrologic Engineering Center |
| h_w | Hauteur d'eau en amont de l'ouvrage |
| I | Matrice unitaire |
| LSJ | Lac St-Jean |
| MW | Mégawatt |
| Man | Coefficient de Manning |
| n | Coefficient de Manning |
| T | Temps |
| T | Symbole de la transposition |
| U | Vecteur de la vitesse |
| ν_o | Viscosité cinématique |
| ν_e | Viscosité de turbulence |
| W | Vecteur de la vitesse du vent |
| Z | Niveau du lit de la rivière |
| ∇ | Opérateur divergence |
| 2D | Modélisation bi-dimensionnelle |

INTRODUCTION

De plus en plus de rivières sont aménagées pour satisfaire les besoins de l'homme. Partout où se retrouvent des ouvrages de régulation de l'eau ou des centrales hydroélectriques, une gestion de l'eau est nécessaire. Cette gestion tente de concilier la disponibilité de l'eau à toutes les demandes, comme les besoins énergétiques, environnementaux et récréatifs, tout en assurant la sécurité des ouvrages et de la population. Beaucoup d'efforts doivent donc être consacrés à rendre la gestion de l'eau optimale et à satisfaire ces besoins parfois opposés. La capacité de représenter le comportement d'un cours d'eau en fonction du temps laisse entrevoir une possibilité d'améliorer la gestion hydrique en utilisant la simulation hydraulique comme outil de prévision des caractéristiques hydrauliques du cours d'eau.

De nombreuses entreprises gérant des systèmes hydriques cherchent des solutions afin d'améliorer la gestion de l'eau et les prévisions du comportement de leur système. La compagnie Alcan, installée au Saguenay-Lac-Saint-Jean depuis de nombreuses années, est l'une d'entre elles. Le bassin hydrographique de la région, riche en rivières et en lacs, jouit d'un potentiel énergétique exceptionnel. Plusieurs barrages, centrales et lignes de transport ont été aménagés pour rendre la compagnie autosuffisante sur le plan énergétique; Alcan dispose maintenant d'une puissance installée d'environ 2700 MW.

Le réseau institué est opéré par Énergie Électrique Québec. Ce groupe a développé une expertise dans le domaine de la production d'énergie électrique et dans la gestion hydrique. De plus, il investit beaucoup d'effort dans la recherche et le développement d'outils qui servent à optimiser la production d'énergie électrique.

La recherche réalisée dans le cadre du présent projet respecte cette volonté d'améliorer et de parfaire les outils présentement disponibles pour gérer efficacement le système hydroélectrique. Pour fournir le meilleur rendement énergétique possible avec l'eau disponible dans le bassin hydrographique, il importe d'éviter les déversements inutiles. Il s'avère essentiel de connaître à tout moment les caractéristiques hydrauliques et énergétiques du système, à savoir, les débits à venir, la production énergétique à satisfaire et, particulièrement, les niveaux d'eau à différents points. Cette étude tente de répondre au besoin ciblé qui est de mieux prévoir le niveau en amont des déversoirs et de la centrale Isle-Maligne en supposant des opérations aux ouvrages du complexe. La centrale Isle-Maligne, qui appartient à la compagnie Alcan, est située sur la rivière Grande Décharge, un des deux émissaires du lac Saint-Jean.

La modélisation hydraulique devient une méthode courante depuis les dernières années, de nombreux logiciels ayant été développés à cette fin. Il y eut tout d'abord les modèles unidimensionnels de type permanent comme Hec-2, qui permet le calcul des courbes de remous, ou non permanent comme Dambrk, qui rend possible la simulation de ruptures de barrages. Avec le développement des méthodes numériques de discrétisation du domaine et l'utilisation plus répandue des méthodes de différences finies, d'éléments finis et de volumes finis, des logiciels 2D plus performants ont pu être développés. Certains logiciels permettent désormais de simuler des écoulements en deux et trois dimensions, de passer d'un régime d'écoulement torrentiel à un régime fluvial dans un même domaine (l'inverse est aussi vrai), de prendre en compte le transport de sédiments, etc. Ces logiciels sont de plus en plus utilisés pour simuler le laminage des crues dans les lacs et rivières, ou encore, pour déterminer l'étendue des plaines inondables. Ils peuvent également être utiles pour l'évaluation des dommages lors d'éventuelles inondations.

Le défi à relever dans ce projet consiste à utiliser la modélisation numérique à des fins de gestion hydrique en temps réel. La simulation hydrodynamique est souvent utilisée pour simuler des états d'écoulements typiques ou ayant eu lieu. Cependant, pour connaître les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau en temps réel, cela oblige à simuler les écoulements en continu, pour des états parfois permanents mais souvent transitoires.

L'objectif de cette étude est de fournir un outil informatique qui fait la prévision du niveau d'eau dans le réservoir de la Grande Décharge, pour faciliter la gestion hydrique en temps réel aux complexes hydroélectriques d'Isle-Maline, Shipshaw et Chute-à-Caron, ces derniers étant situés à l'aval du complexe Isle-Maline.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

1.1 Problématique

La société Alcan exploite au Saguenay – Lac Saint-Jean un système hydroélectrique d'une puissance installée de 2 700 MW. Ce système est composé de six centrales, tel qu'illustré à la figure 1.1. Les centrales Chutes-des-Passes, Chutes-du-diable et Chute-à-la-Savane sont situées sur la rivière Péribonka. La centrale Isle-Maligne est localisée sur la Grande Décharge et les centrales Chute-à-Caron et Shipshaw se retrouvent sur le même réservoir de la rivière Saguenay. Trois principaux réservoirs servent à emmagasiner l'eau et alimentent les centrales : les réservoirs de Passes Dangereuses, du lac Manouane et le lac Saint-Jean.



Figure 1.1 : Système hydroélectrique Alcan

Les bassins hydrographiques approvisionnant le réseau hydroélectrique d'Alcan ont une superficie totale de 73 800 km². La distance entre le point le plus au sud du bassin et celui le plus au nord est de 550 km, et la longueur d'est en ouest est de 200 km. C'est sur cette large étendue que les précipitations alimentent les ruisseaux, rivières et les lacs.

Le lac Saint-Jean a comme principaux affluents : les rivières Péribonka, Ashuapmushuan, Mistassini et Mistassibi. Le quart de l'apport total au lac Saint-Jean est régularisé, cette eau est gérée par Alcan en passant par la centrale Chutes-des-Passes et le barrage de Passes Dangereuses. Le reste de l'eau qui entre dans le lac Saint-Jean provient des autres rivières sur lesquelles il n'y a aucun ouvrage hydroélectrique qui contrôle le débit. La sortie d'eau au lac Saint-Jean est régularisée par la centrale Isle-Maligne et les déversoirs situés sur les rivières Petite Décharge et Grande Décharge, avant de rejoindre la rivière Saguenay.

Le principal exutoire du lac Saint-Jean est la rivière La Grande Décharge, ayant environ douze kilomètres de longueur, sur laquelle se trouvent quatre ouvrages de contrôle ainsi que la centrale hydroélectrique Isle-Maligne. Le schéma du site se trouve à la figure 1.2. À l'entrée de La Grande Décharge se trouve un rétrécissement sévère de la section d'écoulement connu sous le nom de gorge. La gorge entraîne la formation d'un gros rapide qui engendre des pertes de charge. Celles-ci se traduisent par un différentiel de niveau pouvant atteindre quelques mètres.

Un peu à l'aval de la gorge, l'élargissement de la rivière crée un petit réservoir. À la sortie de ce plan d'eau, l'eau poursuit son cours jusqu'à la centrale en croisant, sur son passage, les quatre déversoirs du complexe Isle-Maligne.

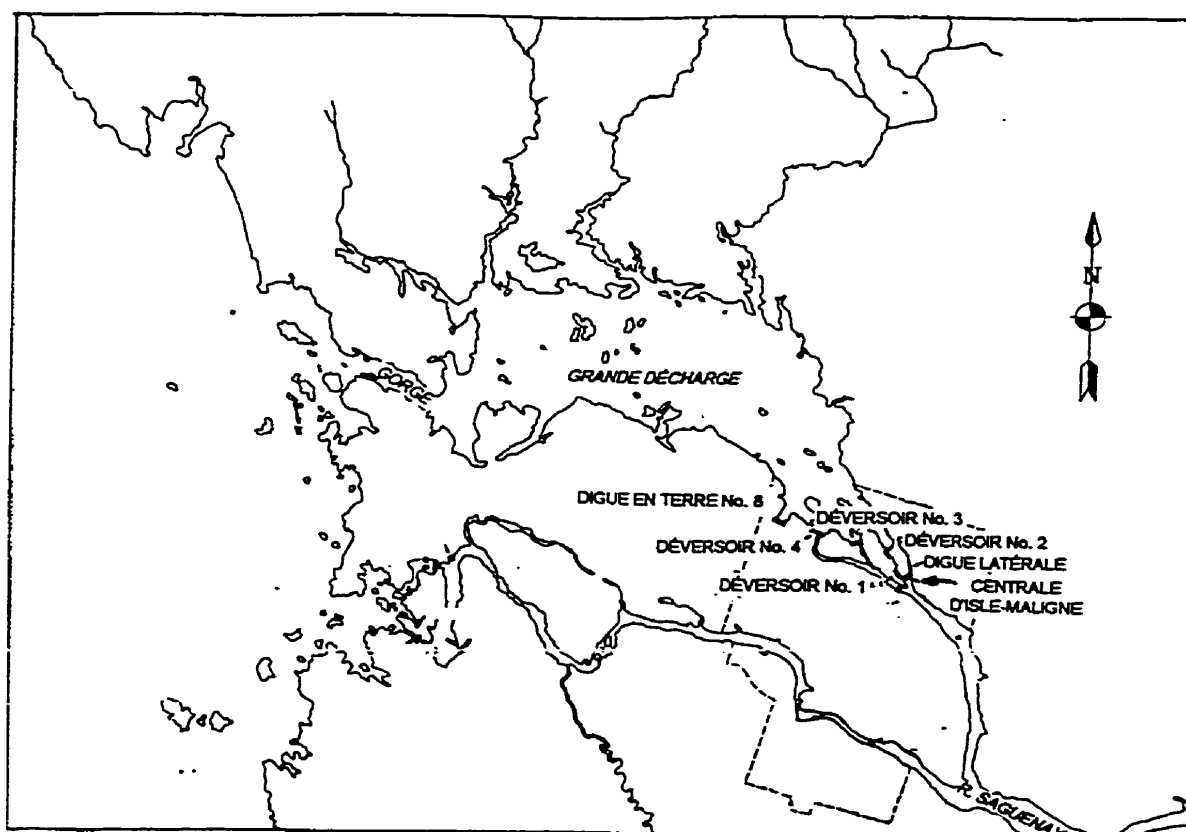


Figure 1.2 : Schéma du site

La Grande Décharge possède une dynamique complexe. Les aménagements d'Isle-Maligne contrôlent l'écoulement mais la gorge influence le débit maximal pouvant sortir du lac Saint-Jean. Le passage de l'écoulement d'un régime fluvial à torrentiel, en passant évidemment par un état critique, fixe un débit maximal pouvant passer dans cette section pour une énergie spécifique donnée soit, plus précisément, pour un niveau du lac donné. De plus, le niveau du lac varie en fonction du débit qui lui est soutiré et des apports qui lui sont fournis; par conséquent, le débit maximal sortant du lac varie aussi. Le plan d'eau situé en amont de la centrale, quant à lui, procure un

effet d'inertie aux changements opérationnels visant la vidange ou le remplissage de la Grande Décharge : suite à une variation d'ouverture des vannes ou du débit turbiné par la centrale, le niveau en amont de la centrale peut prendre plusieurs heures avant d'atteindre un niveau d'équilibre.

Cela rend ardu la prévision des répercussions suite à des opérations aux différents ouvrages. Il est très difficile, pour l'instant, de prédire le niveau d'eau en amont de la centrale et des ouvrages d'évacuation en régime transitoire. Ceci a pour effet de rendre imprécises les estimations des débits turbinés et déversés aux évacuateurs du complexe Isle-Maligne. Conséquemment, le débit disponible pour les centrales Shipshaw et Chute-à-Caron, situées en aval de la centrale Isle-Maligne, est lui aussi plus difficile à estimer.

Alcan dispose de courbes qui présentent la relation entre la perte de charge et le débit dans la Grande Décharge pour différents niveaux du lac. Ces courbes permettent d'estimer la perte de charge à l'état permanent mais ne peuvent être utilisées de façon fiable en régime transitoire. Or, le printemps est une période de gestion hydrique intense et l'écoulement dans la Grande Décharge est souvent en régime transitoire durant cette saison en raison des nombreux mouvements de vannes requis pour la gestion de la crue. Cette période est également très complexe en terme de comportement dynamique en raison de la grande variabilité du niveau du lac Saint-Jean dû au remplissage du réservoir, ce qui influence de façon très importante le comportement de la gorge. La connaissance des niveaux en amont des déversoirs est essentielle pour une estimation adéquate des débits évacués, particulièrement requis en cette période de l'année, d'où l'intérêt d'un nouvel outil servant à bien recréer les écoulements dans les conditions printanières. Le modèle d'écoulement sera donc calibré en se basant sur la variabilité des conditions printanières, mais pourra également être utilisé pour toute la période d'eau libre.

Depuis quelques années, de nombreux efforts de développement ont porté sur l'amélioration de la gestion en temps réel du système, en particulier en ce qui a trait à l'acquisition des données pertinentes à la gestion. La connaissance des différentes caractéristiques hydrauliques de la Grande Décharge en régime transitoire apparaît donc comme un outil essentiel pour une bonne gestion en temps réel au complexe d'Isle-Maligne.

1.2 Objectifs spécifiques du projet

Cette étude a comme objectif d'utiliser la simulation hydrodynamique de la rivière Grande Décharge dans le but d'améliorer, ou faciliter, la gestion hydrique en temps réel pour le complexe hydroélectrique d'Isle-Maligne et pour le complexe de Shipshaw et Chute-à-Caron situés à l'aval du complexe Isle-Maligne.

L'objectif du projet est de produire un outil qui aiderait à prévoir le niveau dans le réservoir de la Grande Décharge suite à des opérations aux ouvrages.

Le modèle de la Grande Décharge doit reproduire les variations courantes engendrées par la gestion hydroélectrique et leurs conséquences secondaires induites. On vise à ce que la modélisation du comportement de la gorge et de la Grande Décharge permette de connaître, sur un pas de temps horaire, l'impact d'une modification des conditions d'écoulement sur le niveau amont et le débit évacué à la centrale et aux déversoirs. Par une estimation plus précise des débits évacués, on vise à optimiser les mouvements de vannes, à réduire les pertes par déversement à Isle-Maligne et à Chute-à-Caron, et à permettre une gestion plus optimale du bief amont de Chute-à-Caron.

1.3 Réalisation du projet

La première étape dans la réalisation de ce projet consiste dans la revue et l'analyse des données hydrométriques. Suite à cette analyse, le choix d'un logiciel de simulation hydrodynamique ou d'une méthode numérique pouvant fournir de l'information en temps réel sur les niveaux d'eau dans la Grande Décharge est effectué. La modélisation de la Grande Décharge est alors réalisée en suivant différentes étapes: La discrétisation du domaine d'étude, l'ajout de l'information sur la bathymétrie, l'imposition des conditions initiales et frontières adaptées au modèle de la Grande Décharge, et le calibrage du modèle afin que les valeurs de niveaux et débits simulées reflètent les valeurs observées dans la Grande Décharge. Enfin, à partir des résultats de simulation obtenus, une évaluation du modèle développé est réalisée et quelques recommandations qui pourraient l'améliorer sont suggérées.

L'outil développé simule en temps réel le niveau d'eau en tout point de la Grande Décharge, de l'entrée jusqu'à la centrale Isle-Maligne, et spécialement en amont des ouvrages, sur un horizon de 24 à 72 heures.

CHAPITRE 2

ANALYSE DES DONNÉES HYDROMÉTRIQUES

2.1 Introduction

Pour le système hydroélectrique d'Alcan au Saguenay – Lac-Saint-Jean, la période de crue printanière, définie du 1^{er} avril au 30 juin, se distingue des autres saisons par l'importance des apports naturels. En effet, pour le bassin versant aval alimentant le Lac Saint-Jean, les apports durant la période de crue printanière correspondent à près de la moitié des apports totaux annuels. Le volume total des apports arrivant au lac Saint-Jean durant cette période équivaut en moyenne à un peu plus de 4 fois la réserve d'emménagement du lac. Une partie des apports est utilisée pour remplir le lac Saint-Jean, dont le niveau est abaissé durant l'hiver afin d'assurer l'alimentation de la centrale d'Isle-Maligne durant cette saison de faible hydraulité, et pour permettre également d'absorber une partie de la crue. La centrale n'étant pas suffisante à elle seule pour évacuer le reste des quantités d'eau reçues, d'importants déversements sont donc requis. La gestion des déversements est par ailleurs assez complexe, en raison de la grande variabilité des conditions hydriques d'une année à l'autre, ainsi que de la sensibilité du système aux conditions hydrométéorologiques observées en temps réel.

La gestion de la crue printanière se caractérise donc, d'une part, par de nombreux mouvements de vannes et, d'autre part, par le remplissage du lac Saint-Jean, ce qui entraîne une grande variabilité dans les conditions d'écoulement à l'entrée de la Grande Décharge. L'analyse des données et le calibrage du modèle d'écoulement sont donc basés sur les données recueillies durant cette période. L'utilisation du modèle pourra toutefois s'étendre à toute la période d'eau libre.

Avant d'entrer dans le processus de modélisation, une analyse des données disponibles a été réalisée afin de se familiariser au comportement dynamique de la Grande Décharge. Cette analyse visait également, d'une part, à vérifier si la perte de charge pouvait être modélisée par une loi simple et utilisable et, d'autre part, à fournir des échantillons représentatifs pour le calibrage du modèle de simulation.

2.2 Informations disponibles

2.2.1 Données hydrométriques et d'opération

Les différentes données ont été fournies par le Groupe Ressources Hydriques, d'Énergie Électrique Québec. Les données horaires de niveaux et de débits sont disponibles depuis 1992. Toutefois, ce n'est que depuis 1994 que les séries sont complètes sur toute la période de crue. L'analyse des données hydrométriques a donc porté sur les données horaires de 1994 à 1997, pour la période de crue normalement définie du 1^{er} avril au 30 juin. Les données antérieures à 1992 correspondent à des moyennes journalières et n'ont pu être utilisées dans le cadre de cette étude en raison de la précision horaire recherchée.

Un utilitaire a été développé afin de fournir, sous forme de tableau, les données horaires suivantes :

- ➔ date
- ➔ heure
- ➔ niveau du lac Saint-Jean (niveau moyen et aux trois jauges Roberval, St-Gédéon et St-Henri)
- ➔ niveau en amont de la centrale d'Isle-Maligne
- ➔ niveau en aval de la centrale d'Isle-Maligne
- ➔ débit turbiné à la centrale d'Isle-Maligne
- ➔ débit déversé à la Petite-Décharge
- ➔ débit déversé à la Grande Décharge

- débit total du lac Saint-Jean
- vitesse et direction du vent à trois stations de mesure

De plus, au printemps 1996 et 1997, deux limnimètres ont été installés, pour les besoins de l'étude, afin de mesurer sur une base horaire le niveau en deux points en amont du déversoir #4. Une première jauge a été installée assez loin du déversoir de façon à ce que le niveau mesuré soit le moins possible influencé par l'ouverture des vannes. La seconde jauge a été installée au droit du déversoir, afin de pouvoir éventuellement améliorer la modélisation des débits évacués par le déversoir. Cette étude sort toutefois du contexte du présent projet. La position des limnimètres est illustrée sur une figure à l'annexe 1.

Pour compléter l'information, des mesures de nivellement ont également été effectuées de façon ponctuelle à la Baie Boudrault, juste en aval de la gorge, lors des principaux mouvements de vannes.

Les figures 2.1 à 2.4 illustrent les données horaires de 1994 à 1997. La période couverte débute au 15 mars, afin d'illustrer l'augmentation progressive de la perte de charge à mesure que le niveau du lac Saint-Jean descend, et se termine au 15 juin, aucun événement majeur n'étant survenu entre cette date et la fin de la crue.

2.2.2 Courbes des pertes de charge utilisées actuellement

Le Groupe Ressources Hydriques dispose actuellement de courbes qui relient les pertes de charge dans la Grande Décharge en fonction du débit total dans la Grande Décharge et du niveau au lac Saint-Jean. Ces courbes sont présentées à l'annexe 2. Selon l'information recueillie, ces courbes seraient valables pour des conditions d'écoulement stabilisées.

2.3 Mode de gestion

2.3.1 Gestion de la crue printanière

La gestion de la crue printanière se prépare avec les prévisions de la crue printanière et la planification de la production. La prédiction de la crue se fait, d'une part, à partir des données hydrométéorologiques disponibles, des relevés de neige effectués et des modèles hydrologiques (MODPREV, PRÉVIS). Une date de départ de la crue, les volumes de crues pour les bassins amont et aval et la pointe sur le bassin total sont estimés. La planification de la production requiert les données suivantes : les prévisions hydrologiques, la prévision de la charge et le calendrier d'entretien. La planification trace les grandes lignes quant à l'évolution des réservoirs ou aux déversements anticipés.

2.3.2 Gestion du lac Saint-Jean

Durant l'hiver, le niveau au lac est abaissé, d'une part, pour répondre à la demande énergétique étant donné les faibles apports au lac et, d'autre part, pour faire place à la crue printanière. Un niveau de 97.88 m est visé pour le 1^{er} avril. Par la suite, le niveau au lac est descendu le plus possible en tenant compte, cependant, de la date de départ de la crue, du volume attendu et de la charge demandée. Compte tenu du bas niveau du lac, le débit de la centrale Isle-Maligne est limité de façon à ne pas descendre sous le niveau minimum à respecter en amont de la centrale. La perte de charge maximale atteinte dans ces conditions est de l'ordre de 4 m.

L'ouverture complète des déversoirs de la Petite Décharge (#5, #7), se produit lorsque les apports au lac Saint-Jean excèdent la capacité de turbiner à la centrale Isle-Maligne. L'ouverture des déversoirs de la Grande Décharge débute lorsque le lac Saint-Jean atteint une élévation d'environ 98.2 m. À ce niveau, le débit entrant dans la Grande Décharge est suffisant pour permettre à la centrale d'atteindre son débit

maximum et débiter le remplissage de la Grande Décharge. Le déversoir #4 étant plus éloigné de la centrale que les déversoirs #1 et #3, son ouverture primera sur les autres; il affecte moins la hauteur de chute à la centrale.

La fermeture des vannes survient lorsqu'un débit total au lac Saint-Jean, qui correspond à la somme des débits de la Petite Décharge et de la Grande Décharge, d'environ 2000 m³/s est atteint. Ce débit additionné au débit fourni par les apports naturels à Chute-à-Caron correspond à la capacité de turbinage des centrales Shipshaw et Chute-à-Caron. Ainsi, les déversements sont minimisés à Chute-à-Caron et la centrale Isle-Maligne profite d'une hauteur de chute plus grande, réalisant de ce fait des gains énergétiques.

Avec la montée progressive du niveau du lac et de la Grande Décharge, on procède graduellement à la fermeture des vannes du déversoir #4 pour maintenir le débit à 2000 m³/s. En fonction de l'évolution de la crue, et en tenant compte des risques de dépasser la cote maximale au lac Saint-Jean, on procède, au besoin, à la réouverture du déversoir #4, et des déversoirs #3 et #1, si cela est requis.

Enfin, la fermeture des déversoirs se fait dans l'ordre inverse de l'ouverture.

2.4 Comportement dynamique de la Grande Décharge

Plus le niveau du lac Saint-Jean est bas, plus les pertes de charge sont élevées pour un même débit. On remarque en effet, sur les figures 2.1 à 2.4, que la perte de charge s'accroît de façon importante en fin mars, début avril, lorsque le niveau du lac descend sous les 98.5 m environ, et ce malgré de très faibles variations de débit. Juste avant la montée des eaux, le débit turbiné est réduit graduellement pour éviter que le niveau en amont de la centrale descende sous le niveau minimum de gestion, ce qui explique la période où le niveau en amont de la centrale semble stabilisé à 93.8 m.

Avec la remontée du niveau du lac Saint-Jean reliée à la montée des apports, on peut procéder à l'ouverture complète du déversoir. Le niveau dans la Grande Décharge étant alors très bas, le débit sortant au moment de l'ouverture est assez faible. On remarque toutefois que malgré cette augmentation de débit, le niveau dans la Grande Décharge commence à remonter sous l'influence de la remontée du lac. Jusqu'à ce que la fermeture des vannes soit amorcée, le débit sortant augmente à mesure que le niveau dans la Grande Décharge augmente, et on observe que les pertes de charge diminuent progressivement. Le débit entrant dans la Grande Décharge étant alors supérieur au débit sortant (turbiné + déversé), on assiste donc au remplissage de la Grande Décharge. Avec la fermeture des vannes, le débit déversé devient moindre, ce qui accentue le remplissage.

Lors d'une réouverture des vannes, on observe une montée soudaine du débit, qui s'atténue dans les heures qui suivent. Le débit entrant devient alors inférieur au débit sortant, ce qui a pour impact de vidanger la Grande Décharge jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint.

La gorge exerce un contrôle sur le débit entrant dans la Grande Décharge. En effet, quand le niveau du lac est bas, la section d'écoulement dans la gorge est restreinte et les vitesses sont assez grandes pour que l'écoulement soit en régime torrentiel. Des photos illustrant l'eau blanche dans la gorge témoignent d'un écoulement torrentiel. Le contrôle d'un écoulement en régime torrentiel se fait de par l'amont.

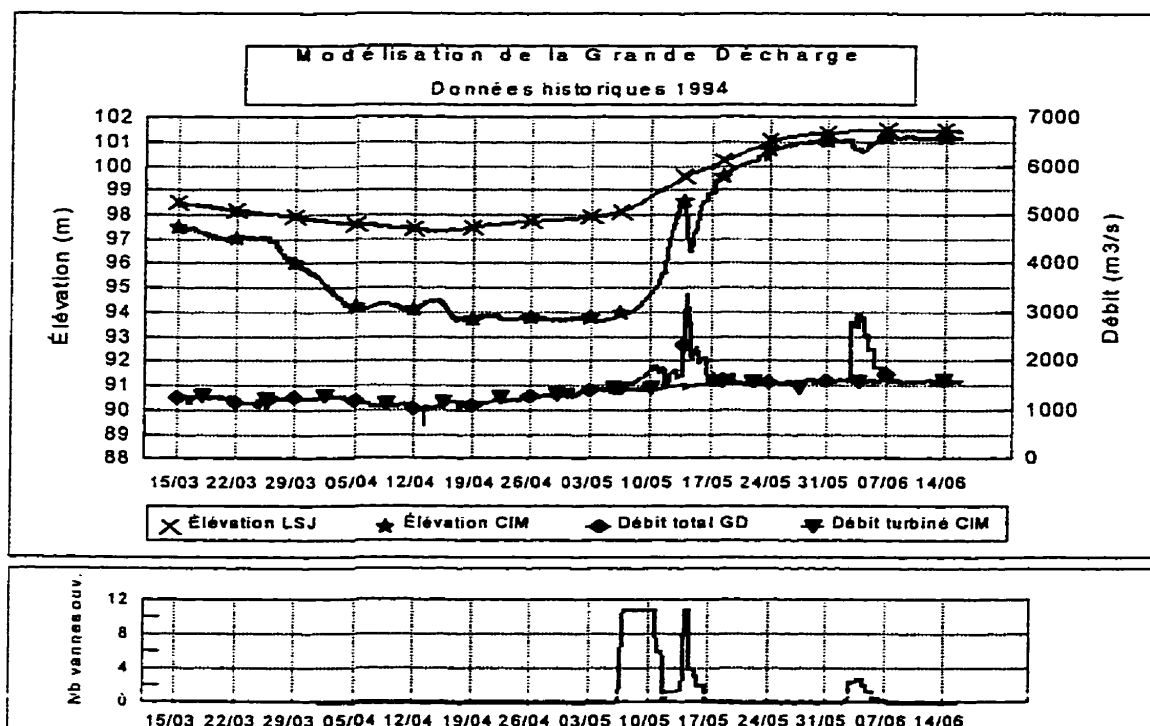


Figure 2.1 : Données historiques 1994

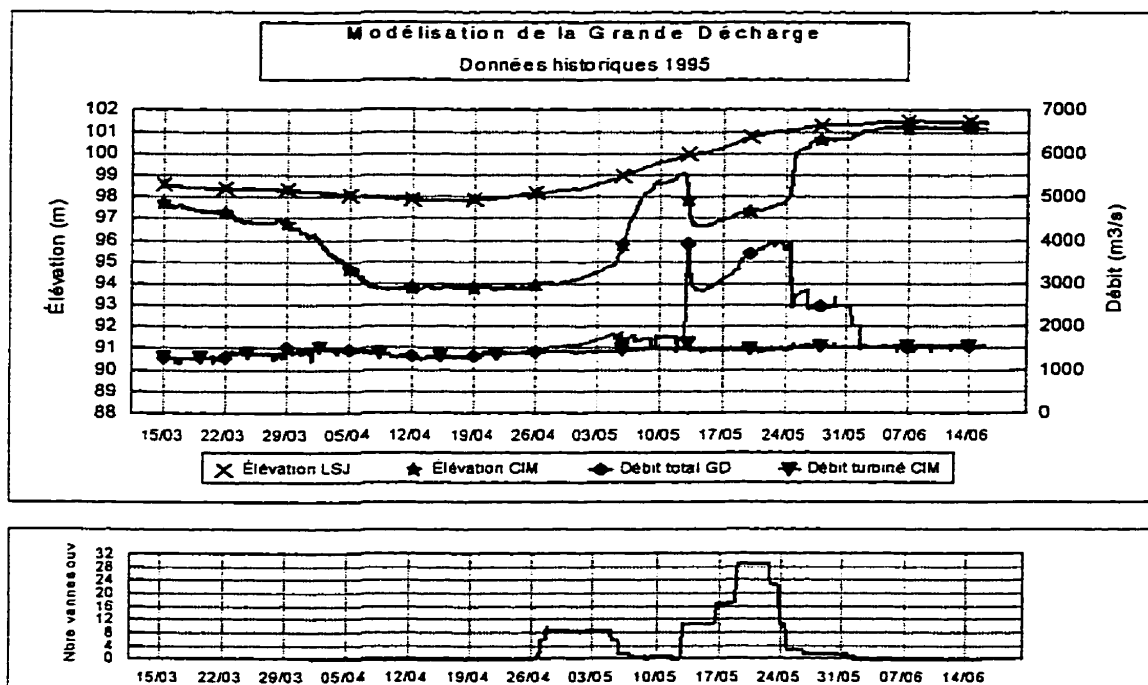


Figure 2.2 : Données historiques 1995

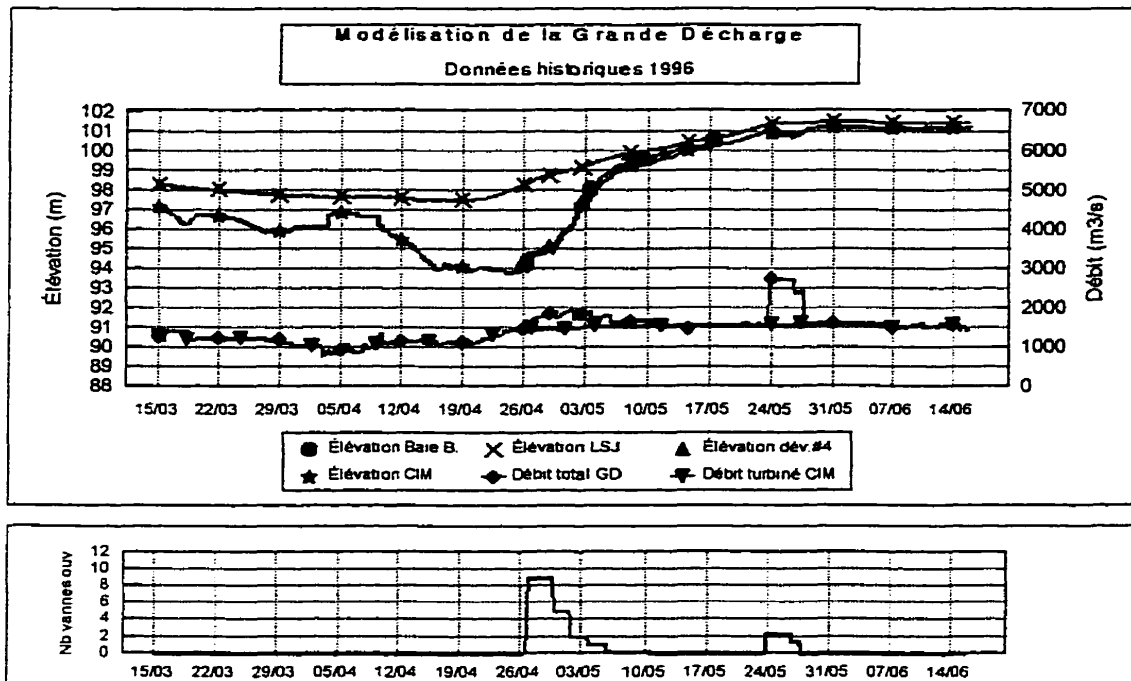


Figure 2.3 : Données historiques 1996

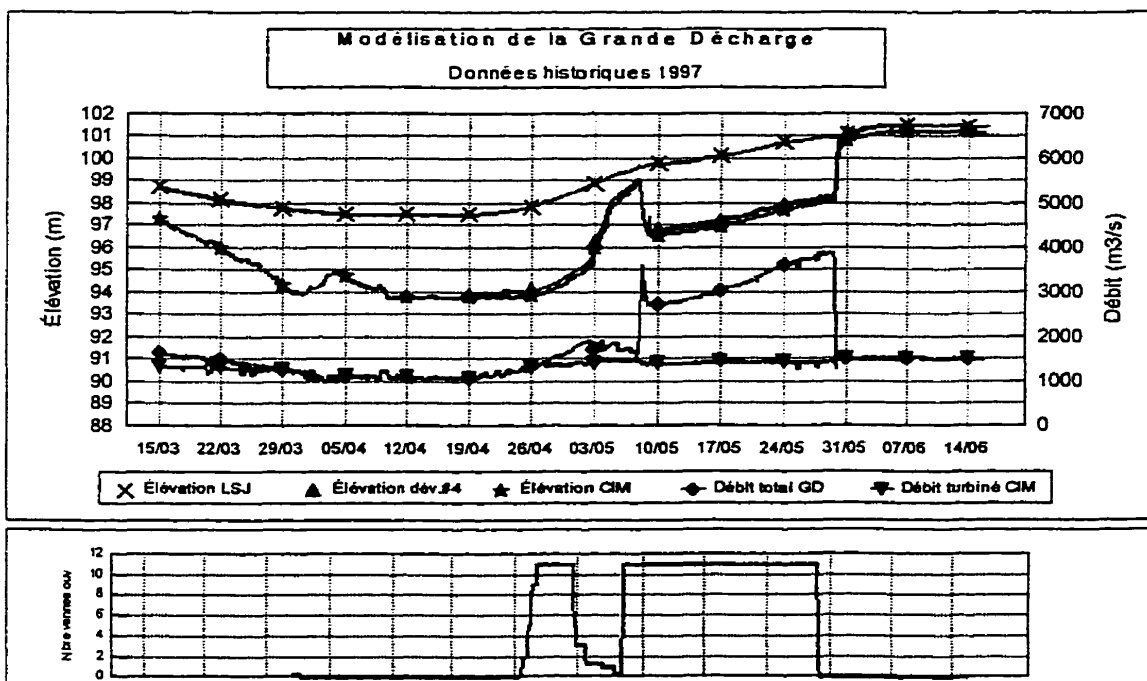


Figure 2.4 : Données historiques 1997

Dans le cas de la gorge, le contrôle est fait par le lac, le niveau de ce dernier détermine l'énergie disponible à l'écoulement et fixe le débit maximum, correspondant au débit critique que peut faire passer la gorge.

Cependant, la Grande Décharge est toujours contrôlée en aval par la centrale ou les déversoirs qui tirent l'eau de la rivière. Ainsi, si le débit évacué est plus grand que celui que peut faire passer la gorge, le bassin de la Grande Décharge se vide. Au contraire, si le débit que fournit la gorge est plus grand que le débit turbiné et déversé, le niveau de la Grande Décharge monte.

Les figures 2.5 et 2.6 présentent un événement mesuré qui illustre ces phénomènes. L'évolution du niveau du lac Saint-Jean et du niveau en amont de la centrale est présentée en fonction du temps ainsi que les débits turbinés et déversés correspondants.

De l'heure 0 à 90, la perte de charge ne varie pas beaucoup, elle passe de 4.29 m à 3.96 m. Les débits entrants sont similaires aux débits sortants. Ensuite, la montée du lac fournit un plus grand débit à la Grande Décharge et le niveau à Isle-Maligne augmente. La hausse des vitesses ne crée pas de pertes de charge assez importantes pour empêcher le niveau de monter. Les déversements réalisés abaissent par la suite le niveau en amont de la centrale, créant davantage de pertes de charge et vidant le bassin de la Grande Décharge. Enfin, la fermeture des vannes fait augmenter le niveau de la Grande Décharge et la perte de charge diminue à nouveau.

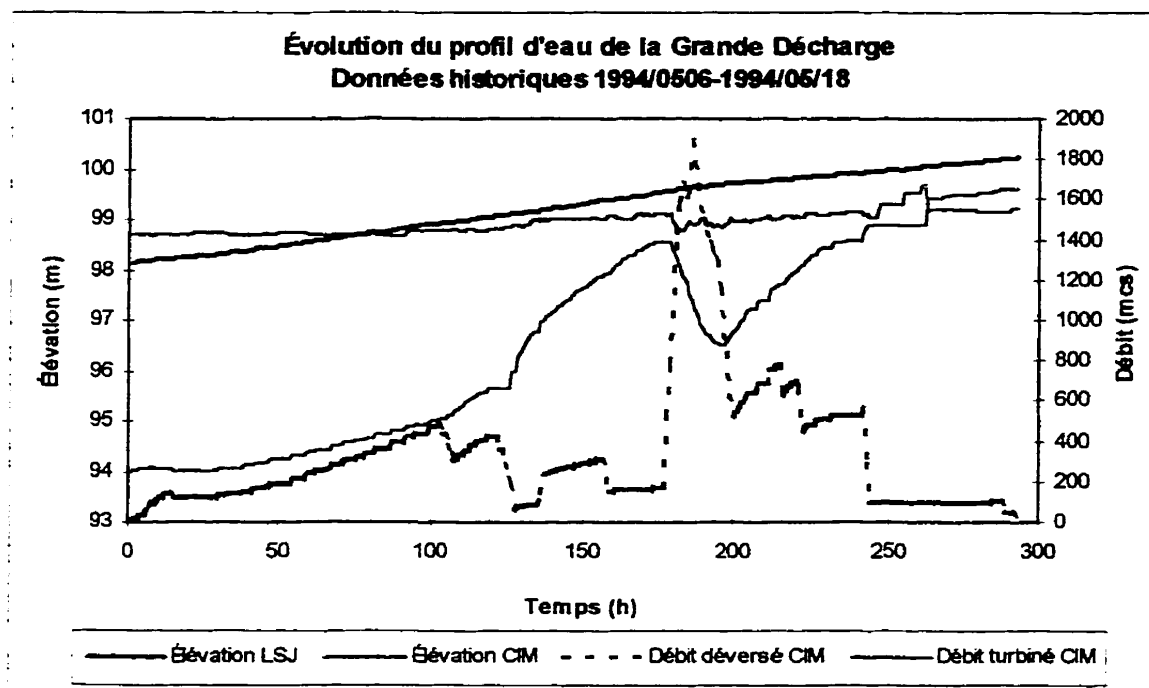


Figure 2.5 : Démonstration du contrôle de la gorge

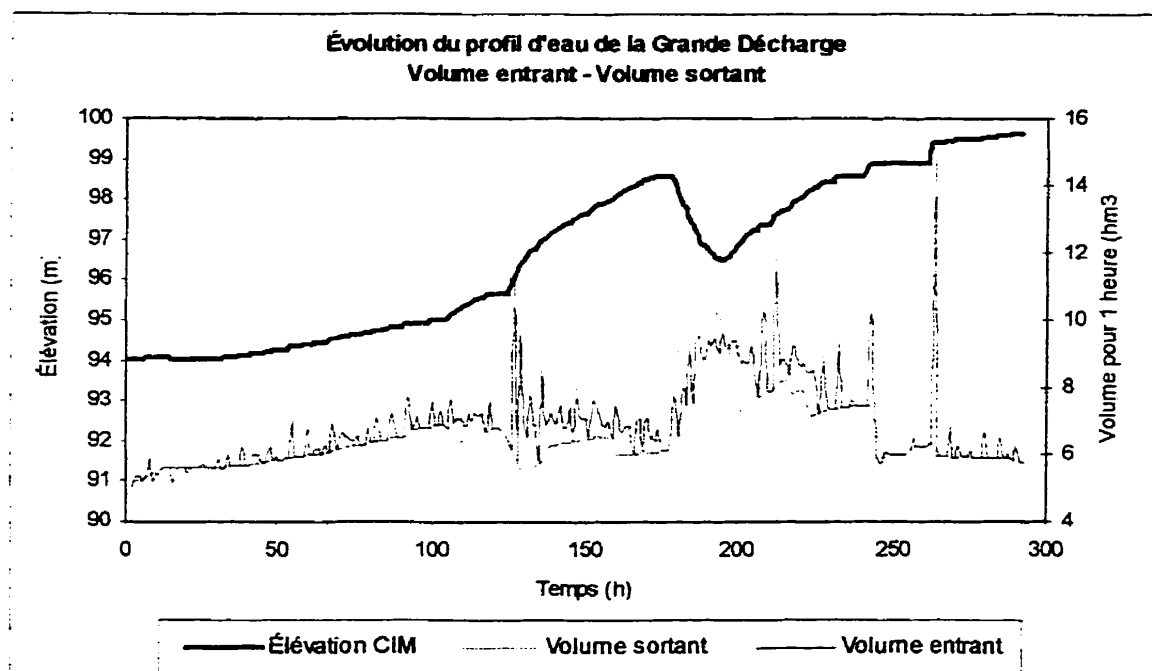


Figure 2.6 : Démonstration du contrôle de la gorge - Volume

2.5 Analyse des pertes de charge dans la Grande Décharge

La prévision des niveaux en amont des ouvrages du complexe Isle-Maligne dépend de l'estimation de la perte de charge dans la Grande Décharge. Une grande attention est donc accordée à la détermination de cette variable particulière. La perte de charge qui correspond à la différence entre le niveau du lac Saint-Jean et le niveau en amont de la centrale Isle-Maligne, est mise en relation avec différentes variables afin de déterminer s'il y a une relation évidente ou directe qui peut la quantifier à tout moment.

Après avoir étudié la variation de la perte de charge dans la Grande Décharge, la localisation des pertes de charge dans la Grande Décharge est déterminée, et un résumé des méthodes utilisées pour tenter d'estimer la perte de charge dans la Grande Décharge pour toutes les conditions d'écoulement est présenté.

2.5.1 Variation de la perte de charge dans la Grande Décharge

Le niveau d'eau au lac et le débit dans la Grande Décharge influencent beaucoup la valeur des pertes de charge. La bathymétrie de la gorge est caractérisée par la présence d'îles et de hauts fonds, ce qui restreint la section d'écoulement, tout spécialement à bas niveau. La baisse du niveau au lac a comme effet de diminuer la section d'écoulement dans la gorge et par le fait même d'augmenter les vitesses d'écoulement. Une hausse des débits a aussi pour effet d'augmenter les vitesses d'écoulement, et comme la perte de charge est fonction du carré de la vitesse, elle est par le fait même largement augmentée aussi. La figure 2.7, qui présente la perte de charge dans la Grande Décharge en fonction du niveau du lac Saint-Jean, pour différentes classes de débit, illustre ces observations.

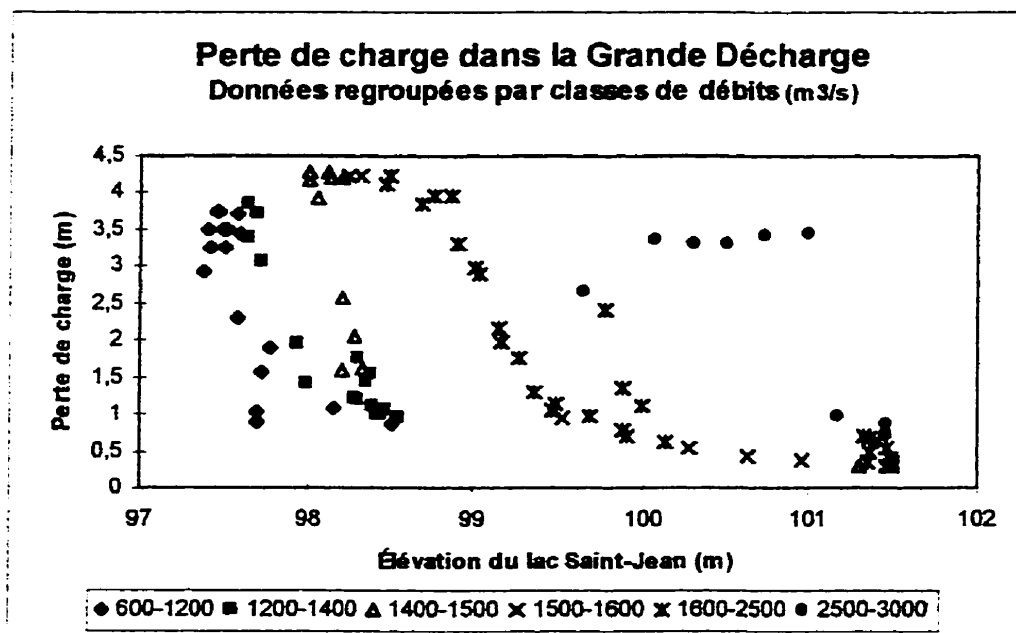


Figure 2.7 : Pertes de charge - Grande Décharge

À mesure que le niveau au lac Saint-Jean augmente, pour une même classe de débit, les pertes de charge diminuent. Pour un niveau du lac Saint-Jean donné, une hausse des débits dans la Grande Décharge amène une augmentation des pertes de charge.

2.5.2 Localisation des pertes de charge

Les pertes de charge dans la Grande Décharge se produisent en majeure partie à deux endroits spécifiques, soit dans la gorge et dans le corridor menant à la centrale Isle-Maligne. Ce sont les deux endroits de la rivière où la section d'écoulement est la plus petite. Par conséquent, c'est là où les vitesses sont les plus grandes, ce qui entraîne des pertes de charge.

La différence entre le niveau au lac Saint-Jean et celui en amont de la centrale Isle-Maligne représente la perte de charge totale. Considérant que la perte de charge dans le bassin de la Grande Décharge est négligeable étant donné les vitesses très faibles dans cette région, la perte de charge occasionnée par la gorge peut être estimée, quant

à elle, par l'écart entre le niveau au lac et celui en amont du déversoir #4. La mesure de niveau de la jauge la plus éloignée du déversoir #4 n'est pas influencée par l'ouverture des vannes à ce déversoir, et peut donc servir à calculer la perte de charge dans la gorge à tout moment. Finalement, en soustrayant le niveau en amont de la centrale au niveau en amont du déversoir #4, on obtient la perte de charge du corridor.

2.5.2.1 Pertes de charge dans la gorge

Comme il est possible de le constater sur la figure 2.8, qui présente les pertes de charge dans la gorge en fonction du niveau au lac Saint-Jean, les pertes de charge dans la gorge varient approximativement entre 0 et 4 m. En regardant les données de 1996 et 1997, on s'aperçoit que la perte de charge n'a cessé de diminuer du niveau 97.5 au niveau 99.5, et ce malgré une augmentation continue des débits dans la Grande D écharge.

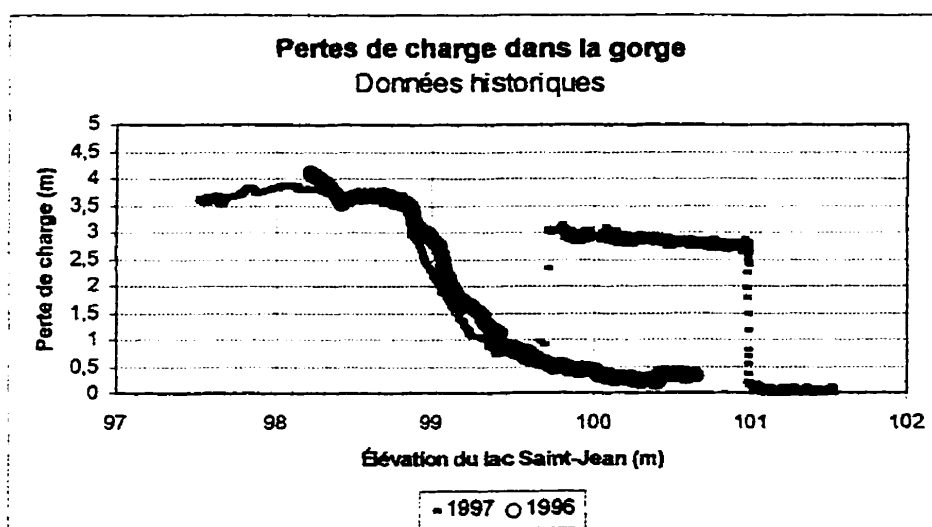


Figure 2.8 : Perte de charge dans la gorge de la Grande Décharge

Entre les niveaux 100 m et 101 m, deux courbes représentent les pertes de charge dans la gorge en fonction du niveau au lac Saint-Jean, pour les années 1996 et 1997. La différence de perte de charge s'explique du fait que la valeur du débit dans la

Grande Décharge est très différente dans les deux cas. Pour les pertes de charge les plus faibles, environ 0.30 m, le débit correspond approximativement à 1500 m³/s, tandis que pour les pertes de charge plus élevées, à peu près 3 m, la valeur du débit se situe aux alentours de 3800 m³/s. La perte de charge est donc aussi fonction du débit dans la Grande Décharge.

2.5.2.2 Pertes de charge dans le corridor menant à la centrale

Les pertes de charge dans le corridor menant à la centrale se situent généralement entre 0.10 et 0.40 m. Un écart de seulement 30 cm sépare donc les deux valeurs. Les figures 2.9 et 2.9 b illustrent cet écart.

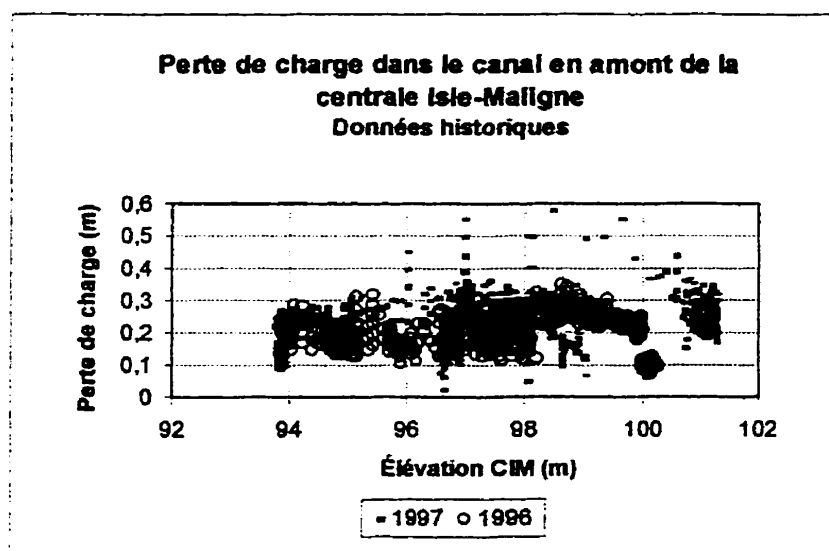


Figure 2.9: Perte de charge dans le corridor menant à la centrale Isle-Maligne

En représentant la perte de charge dans le corridor en fonction du niveau en amont de la centrale, on remarque certains points qui sortent du nuage. Cela peut être dû à une erreur de mesure d'un des niveaux ou au fait que le système soit en transition après une manœuvre visant à augmenter ou réduire les débits sortants. Cependant, il est possible d'observer que les pertes de charge dans le corridor menant à la centrale varient très peu quel que soit le niveau en amont de la centrale et le débit turbiné à Isle-Maligne.

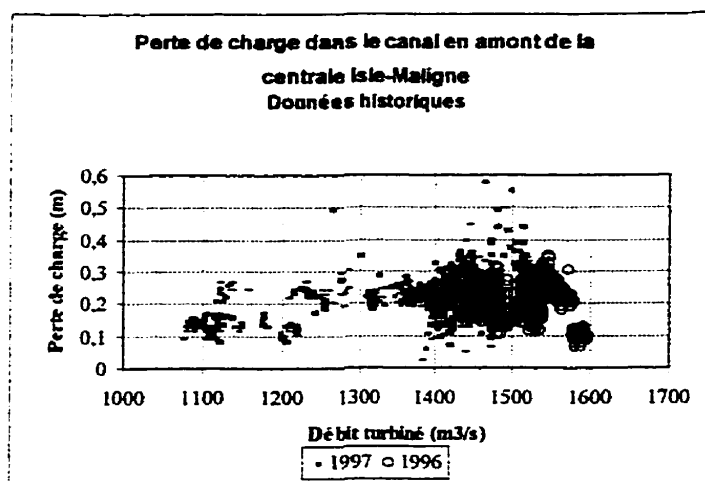


Figure 2.9 b: Perte de charge dans le corridor en fonction du débit

2.5.3 Estimation des pertes de charge dans la Grande Décharge

Les pertes de charge dans la Grande Décharge sont influencées principalement par le niveau au lac Saint-Jean et le débit dans la rivière. Les pertes de charge augmentent en fonction du débit mais, pour un même débit, diminuent suite à une élévation des niveaux. Une élévation du niveau au lac engendre une diminution des pertes de charge dans la Grande Décharge. D'une part, quand la gorge est en régime d'écoulement torrentiel, le débit entrant dans la Grande Décharge augmente, ce qui vient remplir le bassin de la Grande Décharge et, d'autre part, comme la section d'écoulement augmente à mesure que le niveau monte, la vitesse de l'écoulement diminue et les pertes de charge dues au frottement aussi.

2.5.3.1 Perte de charge en fonction du débit évacué

Plusieurs études ont déjà traité du phénomène de pertes de charge dans la gorge. En 1980, la compagnie Alcan a réalisé une étude (Deslauriers, Perron et Thompson, septembre 1980) dans laquelle on a réévalué des courbes reliant le débit total à la Grande Décharge et la perte de charge entre l'exutoire du lac Saint-Jean et le bief d'amont d'Isle-Maligne, pour différentes élévations du lac. Pour ce faire, des valeurs

de niveaux et de débits moyens journaliers ont été utilisées. Les auteurs notent qu'ils ont trié ces données et réalisé une certaine sélection. Un examen visuel ainsi que l'utilisation d'un sous-programme ajustant une régression polynomiale a permis de faire les choix. Les courbes obtenues¹ sont de type logarithmique. Elles sont de la forme :

$$\text{LOG}_{10}(Y) = A + BX$$

avec : Y = perte de charge dans la Grande Décharge (m)

X = Débit total dans la Grande Décharge (m³/s)

A, B = coefficients relatifs à chaque courbe

Ces courbes permettent d'estimer la perte de charge à l'état permanent² mais ne peuvent être utilisées en régime transitoire³. La figure 2.10 illustre bien le phénomène.

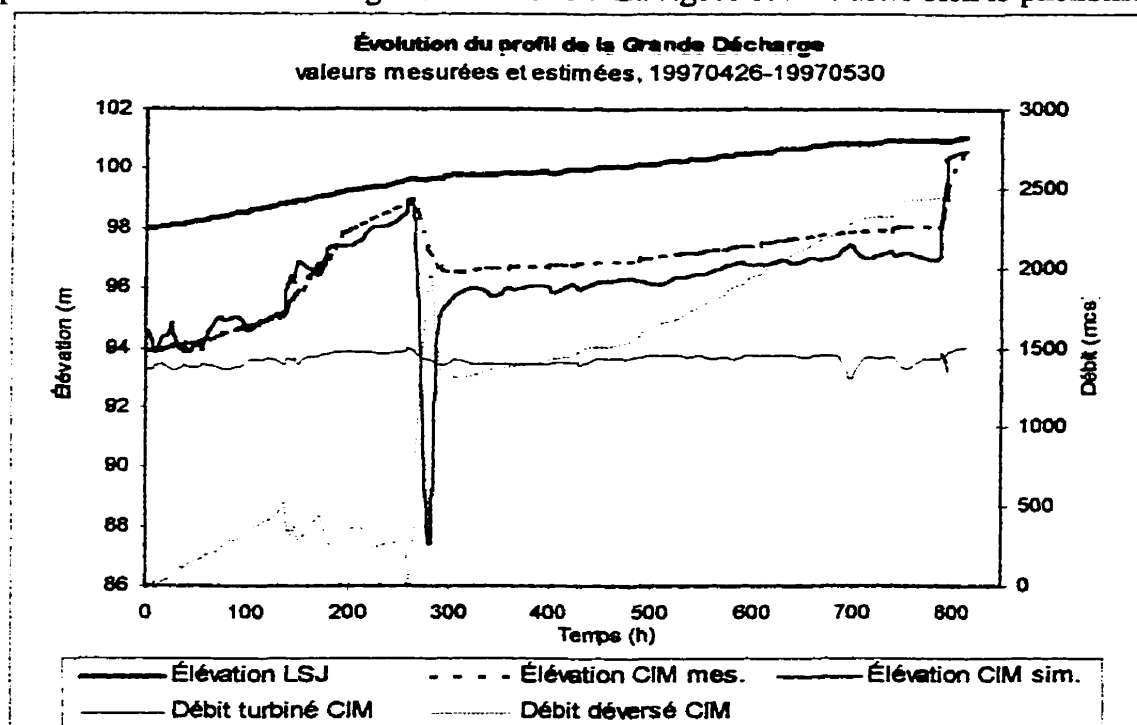


Figure 2.10 : Estimation du niveau en amont de la centrale à partir des courbes

¹ L'équation de chaque courbe et la valeur des coefficients sont fournies à l'annexe 2.

² Les caractéristiques hydrauliques, tels niveaux et débits, sont considérées constantes dans le temps.

³ Les caractéristiques hydrauliques, tels niveaux et débits, varient dans le temps.

L'épisode de déversement de l'année 1997 a été reproduit à l'aide des courbes estimant la perte de charge dans la Grande Décharge. En fournissant à l'équation la valeur du niveau du lac et la valeur du débit total dans la Grande Décharge, la valeur de la perte de charge peut être calculée. La tendance générale de l'évolution du niveau est très bonne; cependant, il peut être constaté à l'heure 279, heure à laquelle on a procédé à l'ouverture des déversoirs, que le niveau en amont de la centrale obtenu à partir des équations est complètement erroné. En effet, la perte de charge calculée, pour un débit total dans la Grande Décharge de $3360 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau au lac Saint-Jean de 99.66 m, est de 12.28 m. Le niveau calculé égale donc 87.38 m, un large écart de 9.77 m avec la valeur mesurée de 97.15 m.

2.5.3.2 Influence des variables niveau et débit sur la perte de charge

D'autres approches ont été étudiées pour tenter de mieux évaluer la perte de charge. On a tenté de mettre la perte de charge, dans un premier temps, en fonction du niveau au lac Saint-Jean et, dans un deuxième temps, en fonction du niveau en amont de la centrale Isle-Maligne, et ce pour différents débits dans la Grande Décharge. Là encore, on voyait clairement que la perte de charge augmente en fonction du débit mais diminue à mesure que le niveau au lac ou dans la Grande Décharge augmente.

On a remarqué que la relation entre la perte de charge et le niveau en amont de la centrale peut être corrélée avec plus de précision que la relation entre la perte de charge et le niveau au lac Saint-Jean. Cela peut s'expliquer par le fait que la perte de charge est calculée en faisant la différence entre le niveau au lac Saint-Jean et le niveau en amont de la centrale Isle-Maligne. Le niveau en amont de la centrale réagit rapidement à tout changement de débit turbiné ou déversé, contrairement à celui du lac.

Le lac Saint-Jean est un plan d'eau important, en superficie et en volume. Étant donné sa très grande capacité d'emmagasinement, un changement des apports dans ce réservoir se fait beaucoup moins sentir que dans le bassin de la Grande Décharge où la superficie, et donc la capacité d'emmagasinement, est bien plus petite. Aussi, puisque les changements de débit sont créés en aval, il est normal que les zones plus en amont, comme le lac, prennent un certain temps à s'ajuster. Les effets engendrés près de la centrale par des opérations aux différents ouvrages doivent remonter la rivière sur une distance d'environ 12 km. Certains effets peuvent même ne pas être ressentis au lac.

Le niveau du lac représente une variable relativement indépendante, du moins à court terme, et peut donc s'avérer une variable utile dans la construction d'un modèle d'estimation des pertes de charge dans la Grande Décharge. Cependant, la performance des courbes mettant en relation la perte de charge en fonction du niveau au lac Saint-Jean ne peut suffire à l'élaboration d'un modèle numérique, le degré de corrélation étant trop faible. On a alors tenté de développer un modèle numérique simple en utilisant les relations définies de la perte de charge et du niveau en amont de la centrale, qui offrait un degré de corrélation meilleur. Comme le niveau en amont de la centrale est inconnu, le niveau du lac sert de conditions initiales et, après avoir posé une première valeur de perte de charge, un calcul itératif est fait jusqu'à l'obtention d'une valeur de perte de charge qui répond à la condition suivante:

- La perte de charge obtenue à l'aide des courbes «perte de charge vs niveau à Isle-Maligne », en utilisant la valeur du niveau à Isle-Maligne calculée en faisant le niveau au lac Saint-Jean, moins la perte de charge obtenue par itération, égale la perte de charge obtenue par itération.

Cependant, cette condition rend le modèle rigide. Il arrive qu'il ne converge jamais vers une solution ou qu'il donne des résultats incohérents.

2.5.3.3 Influence du régime d'écoulement sur la perte de charge

Des changements opérationnels au complexe d'Isle-Maligne ou une variation importante du niveau au lac Saint-Jean modifient les conditions d'écoulement dans la Grande Décharge. Les variations de débits, de vitesses et de niveaux engendrées caractérisent le régime transitoire de l'écoulement. Si le niveau du lac varie peu et qu'aucune opération n'est effectuée à la centrale et aux déversoirs, les conditions d'écoulement se stabilisent à la longue et l'écoulement devient alors en régime permanent.

Pour mieux comprendre l'influence de l'état de permanence de l'écoulement sur les valeurs de niveaux, débits et pertes de charge, l'ensemble des données horaires a été divisé en plusieurs échantillons pour représenter les écoulements permanents. Un échantillon permanent correspond donc à une série de données hydrométriques (niveaux au lac Saint-Jean et en amont de la centrale, débit turbiné et déversé), en ordre chronologique, pour lequel les débits turbiné et déversé sont stables (variations $\leq 10\%$).

Ainsi, cent échantillons ont été formés. Un indice de permanence est associé à chaque échantillon pour mieux apprécier la représentativité de l'état de permanence de chacun d'eux. L'objectif visé par l'utilisation de l'indice de permanence est de cibler les échantillons permanents respectant le mieux le critère de constance des caractéristiques hydrauliques du système, et les autres qui devraient peut-être être rejetés ou interprétés en tenant compte du fait qu'ils ne respectent pas les conditions pour être permanents.

Le tableau fourni à l'annexe 2 présente ces échantillons ainsi que leurs caractéristiques. Dans l'ordre:

- date correspondant à l'échantillon;
- niveau maximum, médian et minimum du lac Saint-Jean;
- niveau maximum, médian et minimum en amont de la centrale Isle-Maligne;
- débit maximum, médian et minimum turbiné et déversé au complexe Isle-Maligne;
- valeur moyenne de la perte de charge, valeur médiane de la perte de charge;
- nombre d'heures de durée de l'échantillon;
- l'indice de permanence.

L'indice de permanence a été calculé comme suit:

$$I_{perm} = \left(\frac{\Delta Q}{T * Q_{med}} \right) * \left(\frac{\Delta N}{T} \right) * 10^6$$

I_{perm} = indice de permanence (mh^{-2})

ΔQ = débit maximum - débit minimum, dans la Grande Décharge (mcs)

T = durée de l'échantillon (h)

Q_{med} = débit médian dans la Grande Décharge (mcs)

ΔN = niveau maximum - niveau minimum, en amont de la centrale Isle-Maligne (m)

Donc, une augmentation de l'indice de permanence signifie une diminution de la qualité de représentativité de l'état de permanence de l'échantillon.

Les échantillons permanents ont servi pour le travail visant à développer un nouveau modèle numérique qui calcule la perte de charge dans la Grande Décharge. Aucun

modèle n'a cependant pu être développé. De plus, il a été impossible de tirer des conclusions en comparant les pertes de charge calculées pour des événements permanents et les autres événements pouvant être considérés transitoires en se basant sur l'indice de permanence.

CHAPITRE 3

MODÈLE D'ÉCOULEMENT

3.1 Logiciels de simulation hydrodynamique

Plusieurs logiciels permettent la construction de différents modèles pouvant simuler les écoulements en rivières. Les modèles unidimensionnels considèrent l'écoulement en une dimension selon l'axe d'écoulement et, de ce fait, la vitesse et le niveau sont uniformes sur une section transversale à l'axe d'écoulement du cours d'eau. Ils peuvent être permanents ou non permanents. Les modèles bidimensionnels tiennent compte de la variation de vitesse et du niveau selon le plan horizontal. Ils donnent donc une répartition transversale et longitudinale des caractéristiques de l'écoulement.

Voici les deux logiciels numériques unidimensionnels les plus couramment utilisés:

3.1.1 Le modèle HEC-2

Le modèle HEC-2 a été développé par le « Hydrologic Engineering Center of the U.S Army Corps of Engineers ». Ce logiciel calcule le profil de la surface de l'eau pour des écoulements permanents en utilisant la méthode standard (Standard Step Method). Hec-2 considère l'écoulement graduellement varié et permet de simuler des écoulements fluviaux ou torrentiels.

3.1.2 Le modèle DAMBRK

Le modèle DAMBRK (Dambreak Flood Forecasting Model) a été développé par D.L. FREAD (1984) pour le National Weather Service aux États-Unis. DAMBRK utilise les équations unidimensionnelles de St-Venant pour calculer les caractéristiques

hydrauliques d'écoulements non permanents. Il est fréquemment utilisé pour simuler le débit sortant d'un réservoir, la crue d'une rivière ou l'onde de rupture d'un barrage.

Plusieurs logiciels peuvent simuler en deux dimensions des écoulements non permanents à surface libre en milieu peu profond.

3.1.3 Le logiciel FESWMS

FESWMS est un logiciel hydrodynamique bidimensionnel, développé par le U.S. Federal Highways Administrations par le Dr. Froelich, et construit à partir de la méthode des éléments finis. Ce modèle permet la simulation d'écoulement en régime fluvial et torrentiel, et tient compte des zones sèches et mouillées. Ce modèle est recommandé pour les domaines d'études comportant des ouvrages de contrôle (déversoirs, conduits, etc.).

3.1.4 Le logiciel HIVEL2D

HIVEL2D, développé par le U.S. Army Corp of Engineers Waterways Experiment Station, est un logiciel hydrodynamique bidimensionnel, utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre le système d'équations différentielles partielles qui décrit un écoulement à surface libre en milieu peu profond. Il peut simuler les écoulements à surface libre en régime fluvial ou torrentiel, aussi bien que la transition entre les deux régimes. Il a été spécialement conçu pour simuler des écoulements dans des canaux à grande vitesse. Il est utile pour déterminer le profil d'eau dans le virage d'un canal ou l'effet d'un ressaut hydraulique.

3.1.5 Le logiciel TELEMAC2D

TELEMAC2D résout les équations de St-Venant à deux dimensions horizontales d'espace, par une méthode d'éléments finis sur des maillages non structurés formés

d'éléments triangulaires (Électricité de France, EDF, 1994). Il est capable de prendre en compte plusieurs phénomènes comme, entre autres:

- écoulement sous l'effet d'une crue, des apports de débits par un cours d'eau, d'une rupture de barrage, ou encore de la marée;
- écoulements fluviaux et torrentiels, et la transition de l'un des deux régimes à l'autre.

3.1.6 Le logiciel TASE/SWAN Plus

TASE/SWAN Plus est un logiciel de simulation hydrodynamique bidimensionnel, développé à l'école Polytechnique de Montréal, basé sur les équations de St-Venant (TASE Software Corporation, 1994). La méthode utilisée pour résoudre ces équations est basée sur une technique de volumes finis. Ce logiciel permet de simuler, *entre autres* :

- les écoulements suite à une rupture de digue ou de barrage ;
- les écoulements en régime fluvial et torrentiel, ainsi que la transition d'un régime à l'autre;
- le laminage engendré par un plan d'eau.

3.1.7 Simulateur de rivière en temps réel

L'utilisation de modèles de simulation des écoulements en rivière demande certaines connaissances techniques de la part des utilisateurs. Ainsi, les logiciels ou modèles numériques courants pour modéliser des rivières sont mal adaptés aux objectifs et au contexte de la gestion des opérations en temps réel (Lavallée, Marche et al).

La tâche principale d'un simulateur en temps réel de rivière est de rendre convivial l'utilisation de ces modèles, que ce soit pour fournir les informations, les contrôles ou

les commandes nécessaires pour la réalisation des objectifs de gestion quotidienne (Sikorski et Krajewski 1988) cité par Lavallée, Marche et all.

En plus des simulateur de rivière, il y a des simulateurs qui permettent la simulation des écoulements dans des systèmes plus ou moins complexes. Souvent développés sous forme modulaire, ces simulateurs englobent différentes composantes, dont une simule le ruissellement et/ou l'écoulement en rivière. Trois exemples de simulateurs, utilisés à des fins de gestion en temps réel, sont présentés plus bas.

Un simulateur a été développé dans le but de faciliter, en période de crue, la gestion du système Highland Lake, constitué de sept lacs connectés en série (Olcay Unver, A. M. ASCE, Larry W. Mays, A. M. ASCE et all.). Ce système est opéré par l'organisation Lower Colorado River Authority (LCRA). Le simulateur englobe cinq modules. Le module DWOPER simule les écoulements entre les réservoirs à partir du logiciel de simulation hydrodynamique unidimensionnel DWOPER; ceci est considéré comme une amélioration par rapport au modèle hydrologique habituellement utilisé. Pour ce type de modèle d'écoulement, un hydrographe des apports est appliqué comme condition frontière amont, et les conditions frontières posées en aval sont soit une courbe de tarage, un hydrographe de sortie ou une relation niveau en fonction du temps. Le module GATES détermine l'information sur les opérations des vannes à fournir au module DWOPER. Le module RAINFALL-RUNOFF calcule le débit fourni par les zones du bassin hydrographiques qui ne sont pas jaugées. Le module DISPLAY permet de visualiser rapidement les résultats sous forme de tableaux ou graphiques et enfin, le module OPERATIONS du simulateur permet le transfert des données entre l'utilisateur et les modules, et entre les différents modules. Ce modèle destiné aux opérateurs de réservoirs est efficace au niveau informatique et très facile d'utilisation.

Un autre exemple de simulateur qui sert à des fins de gestion hydrique en temps réel qui a donné de très bons résultats est celui utilisé pour la rivière Saluda (George Kanakis, jr., A. M. ASCE, et Robert A. Laura, A. M. ASCE). Le modèle de simulation des écoulements en temps réel sur le bassin de la rivière Saluda a été développé dans le but de mieux contrôler les variations du réservoir du lac Murray reliées aux conditions météorologiques en prédisant les apports et les niveaux d'exploitation de ce réservoir en temps réel. Le simulateur a trois composantes principales. La première composante consiste en un système d'acquisition de données, automatique, en temps réel. La deuxième composante englobe les modèles hydrologique et hydraulique qui constituent le modèle Basin Runoff and Streamflow Simulation (BRASS), le modèle hydraulique ayant été développé à partir du logiciel de simulation hydrodynamique unidimensionnel DWOPER. Les conditions frontières appliquées au modèle de la rivière Saluda sont soit un hydrographe d'entrée comme condition frontière amont, et une fonction niveau débit reproduisant les opérations au barrage, ou un niveau, comme condition frontière en aval. Enfin, la troisième composante est le système qui contrôle les opérations informatiques et gère l'information. C'est cette dernière composante qui permet l'utilisation du modèle de simulation des écoulements du bassin de la rivière Saluda de manière conviviale et facilite la cueillette des résultats.

Un dernier exemple est celui du simulateur GESTEAU. GESTEAU a été développé avec l'objectif d'améliorer le rendement total des installations hydroélectriques d'Hydro-Québec (A. Robitaille, F. Welt et L. Lafond). Là encore, une approche modulaire a été utilisée, dix modules composent le simulateur. Deux premiers modules concernent la collecte et la validation des données nécessaires aux modèles. Un troisième module prévoit le ruissellement et simule l'écoulement en rivière en temps réel. Les équations de Saint-Venant sont utilisées pour représenter l'écoulement en rivière. Un autre module traite de la cédule à court terme de la génération estimée à chaque centrale en tenant d'une procédure d'optimisation basée sur les techniques de

programmation linéaire. Il y a aussi le module appelé simulateur hydraulique, qui évalue les conséquences de l'application de différentes conditions d'opération ou de différents scénarios sur le système étudié. Les derniers modules évaluent la répartition optimale des unités d'une centrale, analysent la performance de la gestion sur le rendement énergétique du système, calculent les risques associés à d'éventuelles inondations, estiment les répercussions environnementales reliées à la qualité de l'eau, et un dernier module alerte les opérateurs dans les cas où les contraintes hydrauliques ne pourraient être respectées. Le système GESTEAU, utilisé dans sa version préliminaire, a donné d'assez bons résultats dans une de ses applications visant à optimiser la répartition de la charge sur les différentes unités, et analyser la performance du système.

3.2 Particularité de la Grande Décharge

La simulation de la Grande Décharge amène à traiter des écoulements non permanents qui peuvent passer d'un régime d'écoulement fluvial à torrentiel et par la suite de torrentiel à fluvial et ce, dû à la bathymétrie particulière de la gorge dans la Grande Décharge.

De plus, la localisation des déversoirs sur les rives de la Grande Décharge force à imposer des débits sortant latéralement, c'est à dire perpendiculairement aux sections transversales de la rivière. De ce fait, l'utilisation d'un modèle unidimensionnel est déconseillé, du moins en ce qui a trait à la partie aval de la Grande Décharge où sont situés les déversoirs et la centrale. Par contre, un modèle bidimensionnel permet les variations de niveaux et vitesses sur une section transversale donnée et, par conséquent, facilite la simulation des déversements dans un axe perpendiculaire aux rives du cours d'eau.

Les données importantes pour le modèle sont de type géométrique (rives), bathymétrique (profondeur, Manning) ou hydraulique (niveaux, débits).

Pour respecter le mode de contrôle de la rivière Grande Décharge, les conditions aux frontières imposées au modèle peuvent être de quatre types: à débit nul, à débit imposé, à niveau imposé et à débit induit. La méthode mise au point doit pouvoir y recourir en séquence. Les conditions frontières imposées sont dans un premier temps: à débit nul (rive), à débit imposé (débit entrant dans la Grande Décharge), à niveau imposé (centrale et déversoirs s'il y a lieu). Dans un deuxième temps, les conditions frontières sont imposées ainsi : à débit nul (rive), à niveau imposé (lac Saint-Jean), à débit induit (centrale et déversoirs).

Pour s'assurer que les valeurs simulées ne divergent pas beaucoup, au fil du temps, des valeurs mesurées, chaque condition calculée pourra être confrontée aux mesures instantanées correspondantes, réajustée, puis servira de condition initiale au prochain calcul, si les délais de traitement et de transmission le permettent. Cette phase n'a pas été implantée dans le projet actuel.

Aussi, comme le modèle sert à faire de la gestion en temps réel, il devra être en mesure de fournir une réponse dans un délai assez rapide; dans certains cas, l'information devra être disponible en moins de deux à trois minutes.

Enfin, le modèle de la Grande Décharge devra être validé sur des cas historiques documentés, puis testé sur des séries chronologiques de données. Le modèle sera construit pour simuler les écoulements dans les conditions que l'on retrouve au printemps, mais son applicabilité pourra être étendue aux autres saisons et même aux écoulements avec couvert de glace.

3.3 Choix du modèle

Le modèle numérique TASE/SWAN Plus a été retenu pour cette étude parce qu'en plus de permettre la simulation des principales caractéristiques du problème, il s'est avéré efficace dans la réalisation d'une étude antérieure portant sur la Grande Décharge. SNC-Lavalin a utilisé TASE/SWAN Plus pour la simulation de conditions extrêmes sur la rivière Grande Décharge et des résultats concluants ont été obtenus.

3.4 Présentation du logiciel TASE/SWAN Plus

TASE/SWAN Plus est un logiciel de simulation hydrodynamique, en deux dimensions, pour des écoulements à surface libre en régime permanent ou non permanent. Il permet de passer d'un régime d'écoulement fluvial à torrentiel, et inversement de passer d'un régime d'écoulement torrentiel à fluvial, et de tenir compte des ressauts hydrauliques.

Ce logiciel utilise les équations de Saint-Venant qui décrivent les écoulements à surface libre, non permanents, à deux dimensions, en eau peu profonde. Le développement des équations de Saint-Venant qui est réalisé à partir des équations de Navier-Stokes implique comme principale hypothèse que la distribution verticale de la pression est hydrostatique, donc qu'il n'y a pas de vitesse verticale et que l'accélération verticale est petite. La vitesse en un point donné est représentée par une valeur moyenne sur toute la profondeur. Le système est composé de trois équations qui expriment la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement dans les deux directions horizontales.

Le système peut être représenté par la forme matricielle suivante :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (F - G) = -R - B$$

$$\text{avec, } f = \begin{bmatrix} h \\ U \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} U \\ uU + \frac{1}{2}gh^2 I \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ gh\nabla Z \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu[\nabla U + (\nabla U)^T] \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ C_f U - C_w |w|w \end{bmatrix}$$

où

$$C_f = gn^2 |u| / h^{4/3} \quad (s^{-1});$$

$$C_w = \text{coefficient de la force du vent } ((m/s)^{2-n_w}),$$

où n_w est l'exposant dans l'expression de la force du vent);

$$g = \text{accélération gravitationnelle } (m^2/s);$$

$$h = \text{profondeur d'eau } (m);$$

$$H = h + Z \quad (m);$$

$$I = \text{matrice unitaire};$$

$$n = \text{coefficient de Manning } (s/m^{1/3});$$

$$t = \text{temps } (s);$$

$$T = \text{symbole de la transposition};$$

$$u = \text{vecteur de la vitesse } (m/s);$$

$$U = uh \quad (m^2/s);$$

$$w = \text{vecteur de la vitesse du vent } (m/s)$$

$$Z = \text{niveau du lit de la rivière } (m)$$

$$\nu = \nu_0 + \nu_e g n^2 |u| h^{2/3} \quad (m^2/s)$$

$$\nu_0 = \text{viscosité cinématique } (m^2/s)$$

ν_e = viscosité de turbulence (eddy viscosity)

∇ = opérateur divergence

La méthode numérique pour résoudre les équations de Saint-Venant est basée sur la méthode des volumes finis. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en mailles de différentes profondeurs et à calculer, à chaque pas de temps, les conditions d'écoulement de chacune d'elles à l'aide des équations déjà citées.

3.5 Composition du modèle numérique

Le but de cette étape est de reproduire les principales caractéristiques du domaine à l'étude.

3.5.1 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques servent à définir le domaine d'étude. Les limites du domaine d'étude, la topographie, la bathymétrie et le coefficient de rugosité en rivière (coefficient de Manning) sont les principales caractéristiques physiques du modèle.

3.5.2 Conditions aux frontières

Les conditions aux frontières servent à reproduire le mode de contrôle de la rivière par les parties non représentées. Elles permettent de tenir compte de phénomènes qui se produisent à l'extérieur, ou aux frontières, du domaine d'étude. Elles offrent par exemple la possibilité de simuler l'apport ou le soutirage de débit, ou encore, de fixer des niveaux.

TASE/SWAN Plus permet l'imposition de dix types de conditions frontières :

- débit nul
- débit spécifique
- débit total fixe
- hydrogramme d'entrée
- niveau fixe
- niveau qui varie dans le temps
- uniformité
- symétrique
- externe
- crête

3.5.3 Conditions initiales

Afin de finaliser la représentation du système, des conditions initiales de niveaux et vitesse doivent être définies pour chacune des mailles.

3.6 Simulateur de la Grande Décharge

Le simulateur sera composé de deux modules. Le premier module est constitué du modèle de simulation hydrodynamique de la Grande Décharge. Le second module permet une utilisation conviviale du modèle; il s'occupe du transfert de l'information. Il amasse l'information nécessaire au fonctionnement du modèle, envoie cette information au modèle, commande son exécution et enfin recueille les résultats et les présente sous forme de tableaux et graphiques.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION

4.1 Construction du modèle de la Grande Décharge

Le modèle de la Grande Décharge doit reproduire, sur un pas de temps horaire, les répercussions d'une modification des conditions d'écoulement, débit évacué à la centrale et aux déversoirs, sur le niveau dans la Grande Décharge . Comme le modèle est développé dans le but de faciliter la gestion en temps réel du complexe Isle-Maligne, il doit donc être en mesure de fournir une réponse dans un délai assez rapide ; l'information doit être disponible en quelques minutes. Le modèle de la Grande Décharge a été élaboré de manière à fournir de l'information précise, tout en s'assurant de minimiser le temps de calcul.

À partir du logiciel de simulation hydrodynamique bidimensionnel TASE/SWAN Plus, un modèle est développé pour recréer les écoulements de la Grande Décharge.

4.1.1 Composition de la grille

La première étape dans la construction du modèle de la Grande Décharge est de tracer les courbes délimitant le domaine d'étude, soit la rivière Grande Décharge et une petite partie du lac Saint-Jean. Ces courbes servent de schéma pour introduire les zones qui divisent le domaine d'étude. Un maillage est ensuite créé sur tout le domaine et dans chaque zone, il est densifié ou épuré, selon le besoin.

Des coordonnées identifiant les limites de la rivière Grande Décharge ont été fournies par la compagnie SNC-Lavalin qui a déjà réalisé une étude qui portait sur cette

rivière. Le reste de l'information géodésique et bathymétrique est tiré d'une carte publiée par le service hydrographique du Canada : LAC SAINT-JEAN - LA GRANDE DÉCHARGE ET LES APPROCHES (6100).

La Grande Décharge est parsemée d'îles. La représentation de ces îles nécessite un maillage plus fin dans les zones étroites utilisées pour les contourner.

Pour répondre aux exigences de temps de simulation, il faut utiliser une grille la plus épurée possible. Il a été vérifié que, pour le modèle de la Grande Décharge, la présence des îles et une grille plus dense n'améliore pas la précision des résultats, et les temps de calcul sont beaucoup plus longs. De plus, l'écoulement est orienté de la même façon malgré l'omission des îles.

Donc, le modèle final de la Grande Décharge utilisé ne tient pas compte des îles, et le domaine d'étude y est divisé en 19 zones et 181 mailles.

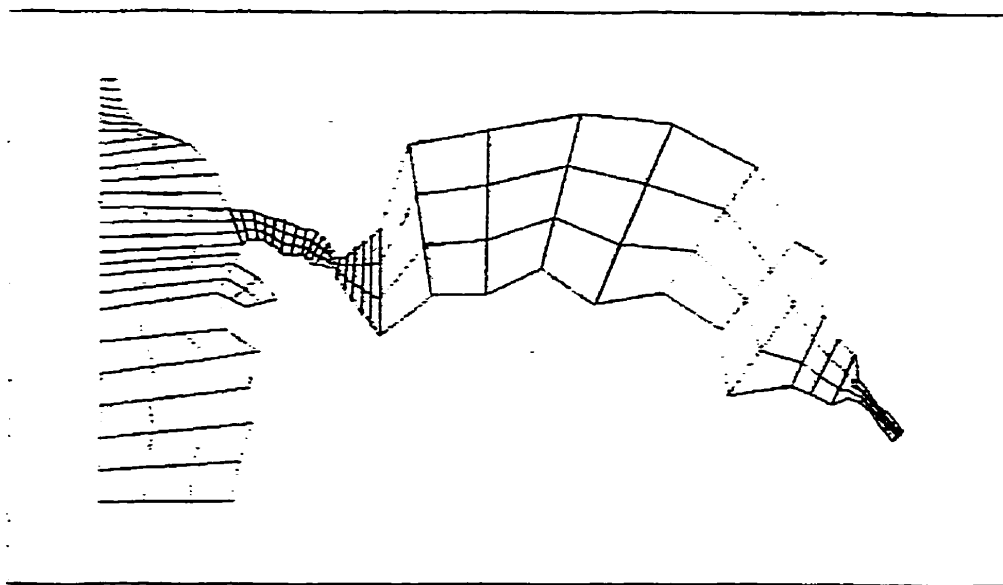


Figure 4.1 : Présentation du maillage du modèle de la Grande Décharge

Avec un ordinateur Pentium 166, la grille tenant compte des îles, composée de 34 zones et 945 mailles, prendrait environ 50 minutes pour simuler 20 heures d'écoulement alors que le temps de calcul est réduit à 4 minutes avec la grille actuellement retenue.

4.1.2 Bathymétrie

Une fois le domaine défini en plan, l'ajout de la bathymétrie crée une représentation du cours d'eau en trois dimensions. À partir de chaque valeur de profondeur du lit fournie au modèle, TASE/SWAN Plus interpole entre chacune, et alloue une valeur bathymétrique pour chaque maille du modèle. Une augmentation du nombre de mailles permet donc de reproduire avec davantage de précision le relief naturel du cours d'eau. Ainsi, pour recréer avec précision les conditions que l'on retrouve à un site, cela demande une discrétisation du domaine très fine.

Étant donné le nombre limité de mailles du modèle de la Grande Décharge, dû aux contraintes sur le temps de calcul, il est difficile de représenter fidèlement la bathymétrie de la Grande Décharge et de la gorge caractérisée par plusieurs hauts-fonds. La représentation de la bathymétrie de la Grande Décharge reste alors schématique. Chaque section transversale de la rivière est représentée par un rectangle, de largeur variable selon la morphologie du cours d'eau ; seule la pente du lit change par endroit.

4.1.3 Conditions frontières et conditions initiales

Les conditions aux frontières permettent de définir les conditions à l'extérieur du domaine d'étude et ainsi reproduire le mode de contrôle du cours d'eau à l'étude. Les conditions initiales représentent l'état de la rivière en début de simulation ; elles fixent les valeurs de niveaux et de débits au temps zéro de la simulation.

L'établissement des conditions initiales se fait en deux étapes en appliquant, pour chacune d'elles, différentes conditions frontières. Dans un premier temps, les conditions frontières appliquées servent à reproduire le profil d'écoulement et, dans un deuxième temps, à recréer le plus justement possible le mode de contrôle de la rivière.

Pour obtenir les conditions initiales, on fait une première simulation en représentant la Grande Décharge comme un plan d'eau horizontal, à l'élévation du lac Saint-Jean. Les conditions frontières imposées sont alors :

- ➔ débit spécifique au lac Saint-Jean
- ➔ niveau à la centrale et aux déversoirs ouverts

Le débit spécifique correspond au débit de la Grande Décharge divisé par la longueur de la frontière du lac. Puisque l'on considère les conditions initiales permanentes, la simulation se poursuit jusqu'à ce que les conditions d'écoulement se soient stabilisées et la Grande Décharge atteigne alors la pente d'écoulement désirée. Appliquées ainsi, les conditions aux frontières respectent les recommandations suggérées par les auteurs du modèle TASE/SWAN Plus et assurent la bonne convergence de la simulation. Enfin, l'imposition de ces conditions aux frontières permet de recréer rapidement les conditions initiales.

En partant de cette solution stabilisée, on pose de nouvelles conditions frontières qui représentent bien la façon dont la Grande Décharge est contrôlée :

- ➔ condition de niveau au lac Saint-Jean
- ➔ condition de crête à la centrale et aux déversoirs ouverts

La condition de niveau appliquée au lac exerce indirectement un contrôle sur le débit entrant dans la Grande Décharge et les conditions de crête recréent les débits à la centrale et aux déversoirs.

La condition de crête s'exprime ainsi :

$$Q = cd * l * (h_w - h_b)^{3/2}$$

où

Q = débit (m^3/s)

cd = coefficient de débit ($m^{1/2}.s^{-1}$)

l = largeur de l'ouvrage (de la condition frontière) (m)

h_w = niveau d'eau en amont de l'ouvrage (m)

h_b = élévation du seuil (m)

C'est avec ces dernières conditions frontières que se poursuit la simulation hydrodynamique de la Grande Décharge. La condition de niveau du lac évolue en fonction du temps et le coefficient de débit est modifié en tenant compte des nouveaux débits et niveaux en amont de chaque ouvrage. Dans le cas des déversoirs, l'imposition d'une condition de crête recrée ce qui se produit en réalité, soit une augmentation du débit déversé suite à une hausse du niveau de la Grande Décharge. Pour ce qui est de l'application de cette condition à la frontière représentant la centrale, elle sert plutôt d'artifice de calcul en simulant précisément le débit turbiné tout en permettant de respecter les critères de stabilité nécessaire à TASE/SWAN Plus.

4.2 Calibrage du modèle de la Grande Décharge

Le calibrage du modèle numérique est l'étape où différents paramètres sont ajustés afin que le modèle puisse représenter, le plus fidèlement possible, les phénomènes

observés dans la réalité. Le calibrage se joue principalement sur trois tableaux : l'imposition des conditions aux frontières appropriées, l'ajustement de la bathymétrie et l'application du coefficient de rugosité (coefficient de Manning) adéquat appliqué sur toute la grille. Les conditions frontières imposent le mode de contrôle de l'écoulement, la bathymétrie génère le frottement majeur qui engendre la majorité des pertes de charge et le coefficient de rugosité fait le réglage des pertes de charge.

À partir du moment où une démarche pouvant reproduire le type d'écoulement désiré, avec des conditions aux frontières appropriées, est identifiée, et que l'ordre de grandeur des pertes de charge est atteint, la bathymétrie étant adaptée pour engendrer les pertes de charge voulues, on raffine la solution en trouvant la valeur du coefficient de Manning qui rapproche le plus la simulation du cas observé.

Dans ce modèle de la Grande Décharge, le coefficient de rugosité reproduit le frottement réel et compense pour l'imprécision de la bathymétrie du modèle sur celle que l'on retrouve en réalité. Le coefficient de Manning est ajusté pour recréer les pertes de charge observées dans la réalité et devient donc un paramètre de calibrage très important.

4.2.1 Ajustement de la bathymétrie

Le calibrage du modèle se fait, dans un premier temps, à partir d'écoulements permanents. Ainsi, à l'état permanent, les valeurs de niveaux et de débits sont constantes dans le temps. Par conséquent, la perte de charge aussi, et les conditions aux frontières n'ont pas à être modifiées étant donné la constance des conditions à l'extérieur du domaine d'étude. Cela permet donc de fixer la bathymétrie qui peut recréer globalement les pertes de charge sous différentes conditions de niveaux et débits et d'ajuster le coefficient de Manning pour reproduire justement la perte de charge observée dans la réalité.

Comme la majorité des pertes de charge se produisent dans la gorge, une attention particulière est portée à la reproduction de la bathymétrie dans la gorge pour qu'elle serve à recréer les pertes de charge mesurées dans cette partie de rivière. La justesse de la bathymétrie partout ailleurs influence très peu la précision obtenue sur les pertes de charge dans la Grande Décharge, les vitesses étant généralement très faibles.

La bathymétrie a été fixée à 20 m de profondeur, de la centrale jusqu'au bassin et elle varie ensuite, de façon linéaire, jusqu'à la gorge où est placé un haut-fond. Ce haut-fond, d'une longueur de 2.4 km, s'élève à 94.5 m. Il restreint la section d'écoulement et engendre des pertes de charge importantes, spécialement à bas niveau. Enfin, la partie du lac est d'une profondeur d'environ 20 m aussi. La figure 4.2, qui suit, présente la pente du lit de la Grande Décharge.

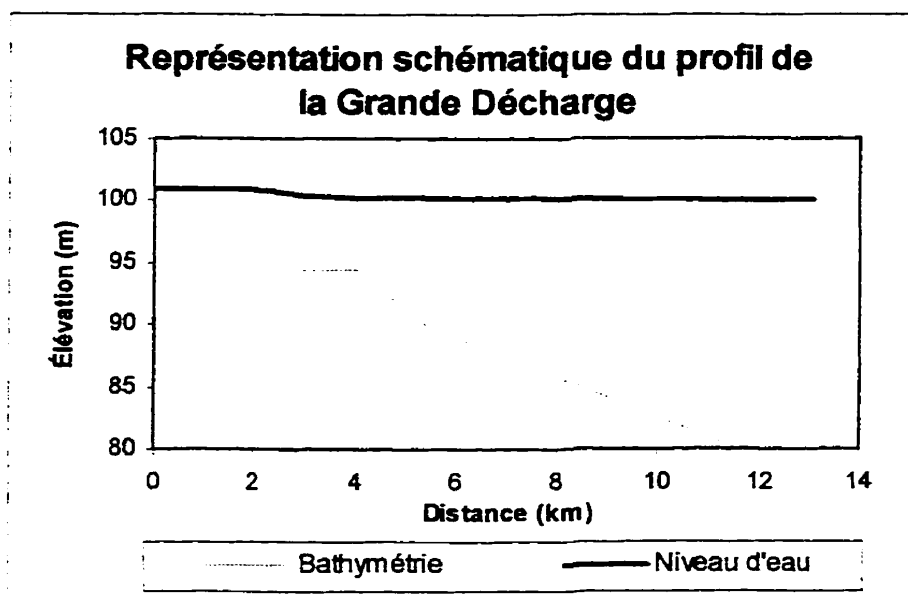


Figure 4.2 : Représentation du profil de la bathymétrie de la Grande Décharge

4.2.2 Calibrage des événements de déversement

Sur les quatre années de données horaires utilisées, 5 épisodes de déversements, faisant en tout 1800 heures, ont servi à calibrer le modèle de la Grande Décharge.

La simulation en régime transitoire nécessite continuellement des changements de débit à la centrale et aux déversoirs; les conditions aux frontières servant à représenter ces opérations doivent donc être modifiées, au fil du temps, elles aussi. La simulation d'un événement en régime transitoire se fait de façon séquentielle, en tenant compte de chaque opération aux vannes ou des changements de débit turbiné. Pour ce faire, les données horaires ont été divisées en groupes homogènes (débits déversés et turbinés constants). Tous ces groupes de données horaires ont été simulés chronologiquement et consécutivement; chacun était réajusté, en modifiant le coefficient de Manning, pour bien coller à ce qui a été mesuré, puis servait de condition initiale pour la séquence suivante.

La figure 4.3, qui suit, illustre l'événement de déversement survenu en 1995. On peut voir qu'en ajustant les Manning, les valeurs de niveaux simulés collent parfaitement aux valeurs mesurées. Tous les résultats du calibrage sont fournis à l'annexe 3.

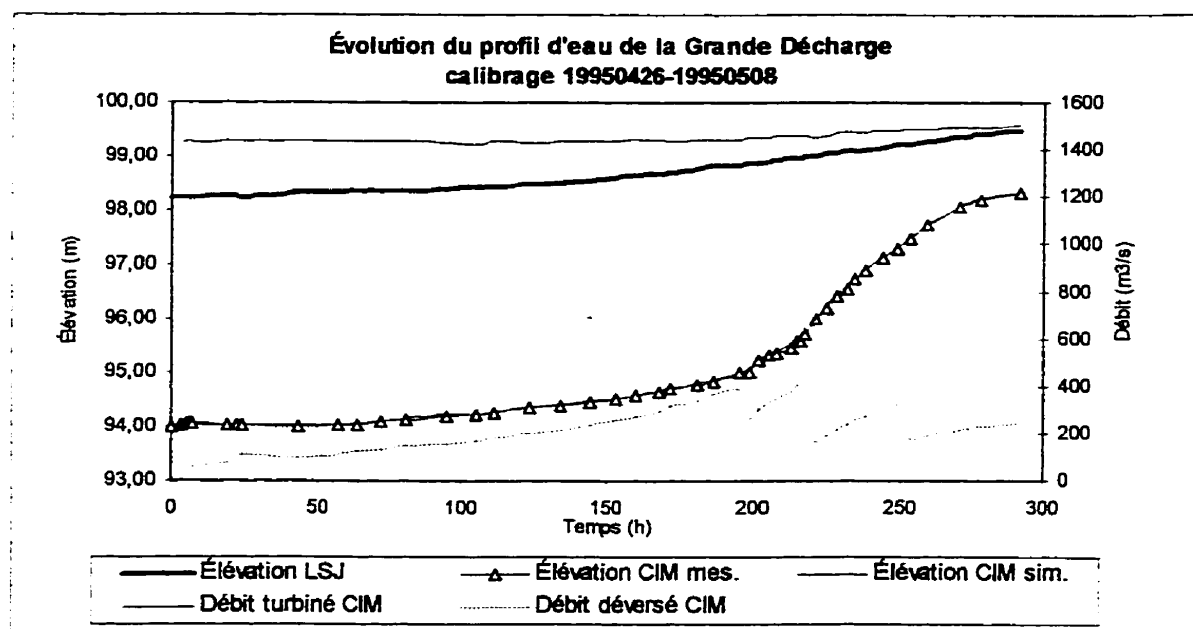


Figure 4.3 : Calibrage du cas de déversement du printemps 1995

4.3 Modélisation du Manning

Pour le bon fonctionnement de l'outil de simulation, le Manning doit se calculer automatiquement en fonction des caractéristiques de l'écoulement de chaque séquence.

En mettant en relation les coefficients de Manning obtenus lors du calibrage avec les différentes caractéristiques de l'écoulement, des modèles d'ajustement du Manning ont pu être développés.

4.3.1 Découpage des séries de données

La figure 4.4 met en relation les coefficients de Manning obtenus pour chacun des petits groupes de données horaires qui ont servi lors du calibrage et la perte de charge correspondante. Elle démontre que le coefficient de Manning suit parfaitement l'évolution de la perte de charge dans la Grande Décharge. En regardant de façon générale cette figure, l'évolution de la perte de charge peut être interprétée en tenant compte des principales règles de gestion utilisées au printemps. Au début du printemps, le niveau du lac Saint-Jean est bas et la perte de charge dans la Grande Décharge est importante. À mesure que le niveau au lac Saint-Jean augmente, on observe dans un premier temps que la perte de charge diminue lentement. Ceci correspond à une augmentation du débit qui remplit le bassin de la Grande Décharge. Après, la perte de charge chute rapidement suite à la fermeture des déversoirs qui a pour but de maintenir le débit total au lac Saint-Jean autour de 2000 m³/s. Le niveau du lac se situe alors à environ 98.7 m. Une réouverture des vannes, alors que le niveau est assez élevé dans la Grande Décharge, produit des déversements considérables et engendre à nouveau des pertes de charge importantes. Enfin, une fois la crue passée, les vannes sont refermées, ce qui ramène la perte de charge à une valeur faible.

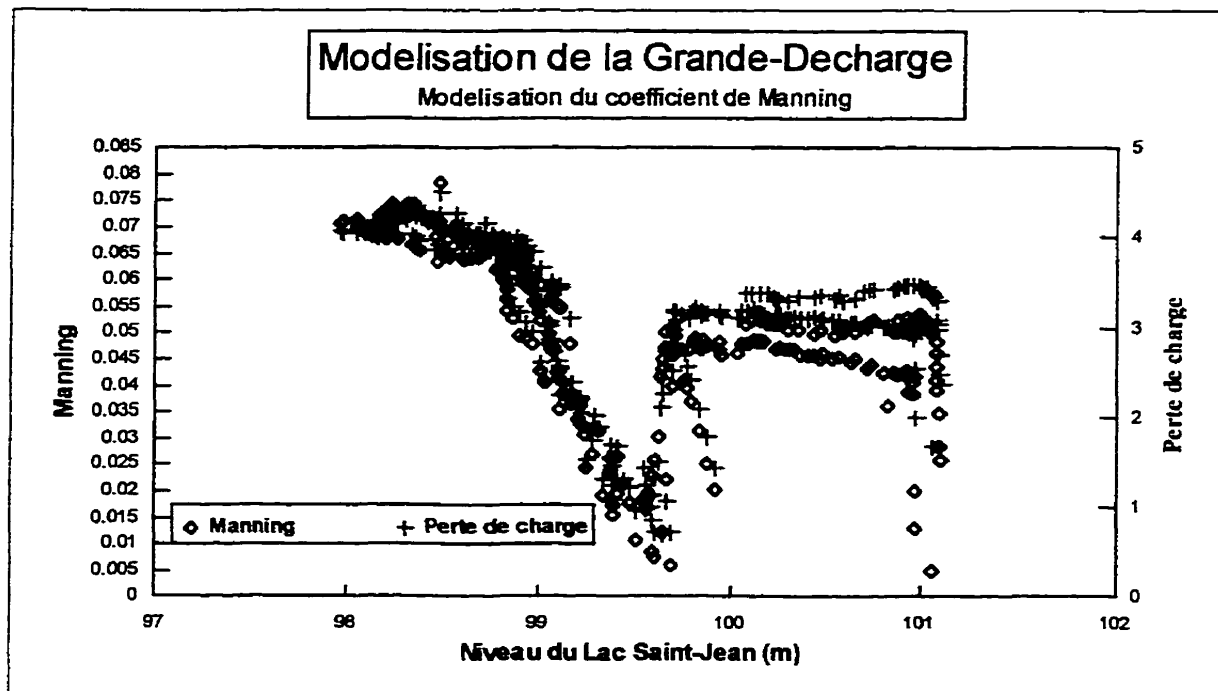


Figure 4.4 : Perte de charge - Manning

Les valeurs du coefficient de Manning changent donc elles aussi en fonction du niveau du lac et du type d'opérations effectuées aux déversoirs. Les figures 4.5 et 4.6 démontrent que, selon que l'on ouvre ou ferme les déversoirs, les coefficients de Manning suivent une tendance particulière. Chaque cas correspond à une série de données horaires tirées des événements de déversements calibrés.

Trois types de cas peuvent être identifiés en ce qui a trait aux déversements dans la Grande Décharge:

- ➔ ouverture des déversoirs ; perte de charge importante dans la Grande Décharge lors de l'ouverture;
- ➔ ouverture des déversoirs ; perte de charge faible dans la Grande Décharge lors de l'ouverture;
- ➔ fermeture des déversoirs.

On compte 7 cas de fermeture, 3 cas d'ouverture à partir d'un écoulement où la perte de charge est faible et 4 cas d'ouverture où la perte de charge est importante. Tous ces cas sont présentés à l'annexe 4.

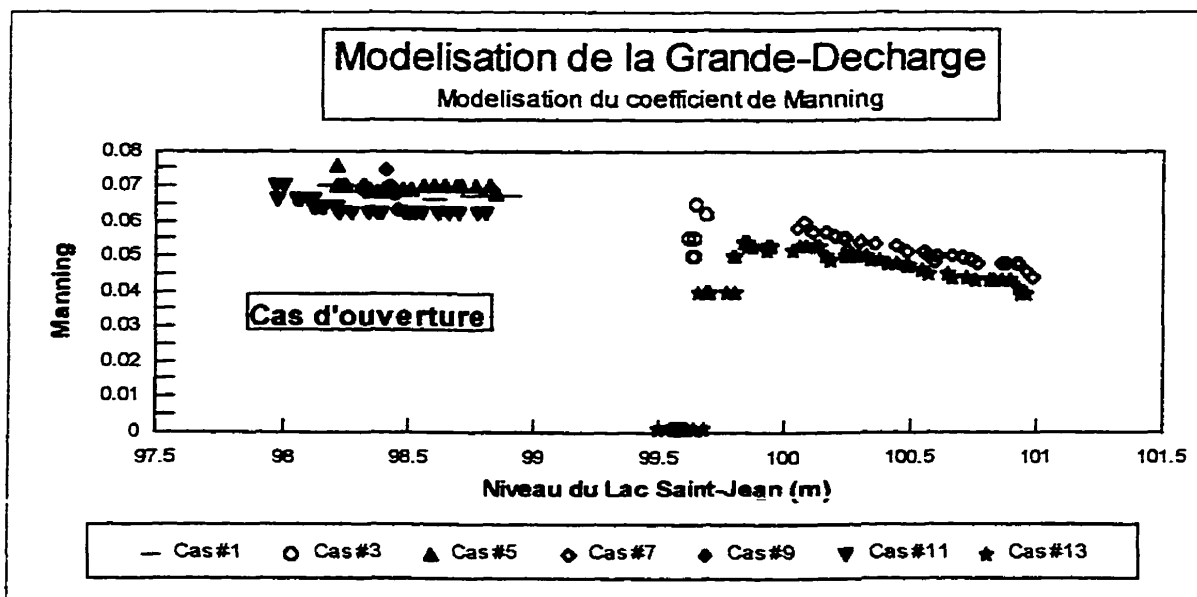


Figure 4.5 : Manning – Cas d'ouverture

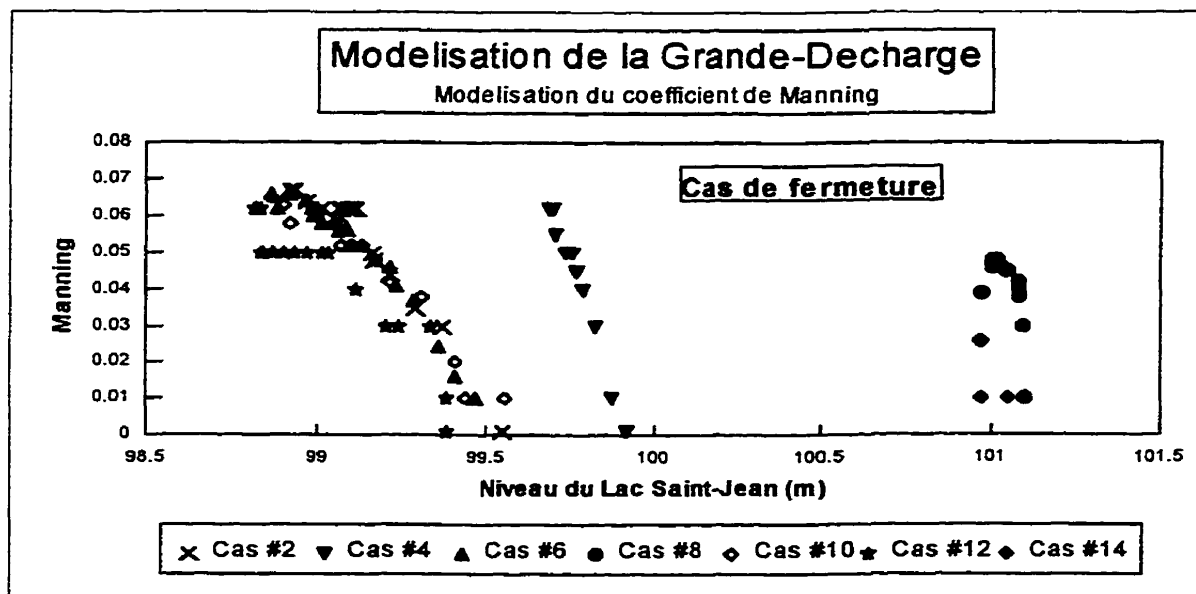


Figure 4.6 : Manning – Cas de fermeture

4.3.2 Présentation des modèles d'estimation du coefficient de Manning

4.3.2.1 Cas de fermeture

$$Man_{s0} = Man_{s-1} + C_1 * (LSJ_{s0} - LSJ_{s-1}) + C_2 * (dh_{s0} - dh_{s-1})$$

où

Man = coefficient de Manning

$C_1 = -0.00751408989047235779$

$C_2 = 0.0163047882945765353$

LSJ = niveau au lac Saint-Jean

dh = perte de charge dans la Grande Décharge

$s0$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence présente

$s-1$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence précédente

4.3.2.2 Cas d'ouverture, avec perte de charge importante (>1.5 m)

$$Man_{s0} = Man_{s-1} + C_1 * (LSJ_{s0} - LSJ_{s-1}) + C_2 * (Qdev_{s0} - Qdev_{s-1})$$

où

Man = coefficient de Manning

$C_1 = 0.0213598578529962225$

$C_2 = -4.73795785933270554 \text{ E-5}$

LSJ = niveau au lac Saint-Jean

$Qdev$ = Débit évacué par les déversoirs de la Grande Décharge

$s0$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence présente

$s-1$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence précédente

4.3.2.3 Cas d'ouverture, avec perte de charge faible (<1.5 m)

- i) Quand le niveau au lac Saint-Jean est plus petit que 100 m.

$$Man_{s0} = C_1 * LSJ_{s0} + C_2 * dh_{s0} + Cte$$

où

Man = coefficient de Manning

$$C_1 = -0.0334936193596080666$$

$$C_2 = 0.0259454093724147157$$

$$Cte = 3.31424853495807315$$

LSJ = niveau au lac Saint-Jean

dh = perte de charge dans la Grande Décharge

$s0$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence présente

$s-1$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence précédente

- ii) Quand le niveau au lac est supérieur à 100 m.

$$Man_{s0} = Man_{s-1} + C_1 * (LSJ_{s0} - LSJ_{s-1}) + C_2 * (Qdev_{s0} - Qdev_{s-1})$$

où

Man = coefficient de Manning

$$C_1 = 0.0215525406059732597$$

$$C_2 = -3.22817928479600397 \text{ E-5}$$

LSJ = niveau au lac Saint-Jean

$Qdev$ = Débit évacué par les déversoirs de la Grande Décharge

$s0$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence présente

$s-1$ = Précise d'utiliser la valeur initiale de la séquence précédente

4.4 Interface modèle-usager

Toute cette information à fournir au modèle peut être lourde pour quelqu'un qui n'est pas familier avec le logiciel TASE/SWAN Plus.

Pour rendre le modèle accessible à l'utilisateur, une interface graphique a été développée afin d'automatiser l'utilisation de TASE/SWAN Plus. Cet outil convivial gère le transfert d'information nécessaire au traitement des données. L'utilisateur n'a qu'à fournir au modèle à l'aide de l'interface :

- les conditions initiales
- les opérations à effectuer aux ouvrages
- le niveau au lac Saint-Jean, en fonction du temps
- le débit turbiné en fonction du temps

L'information est alors traitée, recueillie, puis les résultats sont présentés sous forme de tableaux et graphiques.

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

5.1 Présentation des cas validés

Les cas ont été simulés de la même façon que fonctionne l'utilitaire; avec les mêmes inconnues, en calculant, à chaque séquence, le coefficient de Manning, à partir des modèles développés, et le débit déversé en tenant compte du niveau simulé en amont des déversoirs et du nombre de vannes ouvertes. On considère le niveau du lac Saint-Jean et le débit turbiné comme des variables connues.

Dans la plupart des cas, la performance du modèle de la Grande Décharge a été testée en prenant un horizon d'environ 72 heures.

Pour évaluer le modèle, on compare les valeurs de niveaux et débits simulées avec celles observées. Il est à noter que la valeur de débit simulée présentée est calculée par TASE/SWAN Plus. Or, le débit simulé est estimé en utilisant les caractéristiques du déversoir, déterminées en imposant les conditions frontières. Ceci amène parfois une divergence entre le débit simulé et observé malgré la convergence des niveaux. C'est pourquoi, pour des écarts de niveaux plus petits, on a parfois des écarts de débits plus grands. Ce problème est traité dans la partie 5.2.2.

Chaque cas est présenté par une figure incluse dans le texte et les valeurs de niveaux et débits simulés sont présentées dans les tableaux fournis à l'annexe 5.

5.1.1 Validation des cas de fermeture

La simulation des cas de fermeture donne de bons résultats. La montée des niveaux suite à une fermeture est bien reproduite par les valeurs simulées.

La simulation du cas #12, soit la fermeture de 11 vannes sur une période d'environ trois jours, a bien reproduit les valeurs mesurées. Après 24 heures, l'écart entre les niveaux simulé et mesuré, en amont de la centrale Isle-Maligne, est de 16 cm. Cette erreur sur le niveau crée une différence de débit de $52 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à 14 % du débit déversé. Après trois jours, 22 cm séparent les niveaux mesuré et simulé. La différence entre le débit mesuré et simulé de la Grande Décharge est alors de $24 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui équivaut à seulement 7% du débit déversé.

Sur un horizon de calcul de 72 heures, le cas #6 offre aussi une bonne performance. L'écart entre les niveaux simulé et mesuré n'est que de 3 cm après trois jours et la différence de débit, de $26 \text{ m}^3/\text{s}$, représente 13% du débit déversé de la Grande Décharge. L'écart maximum entre les valeurs de niveaux mesuré et simulé est observé à la 12^{ième} heure ; la différence de niveau est alors de 20 cm et le débit déversé simulé est $43 \text{ m}^3/\text{s}$ plus bas que celui mesuré. La convergence des niveaux, par la suite, a vite ramené l'estimation des débits à des valeurs plus près de celles mesurées.

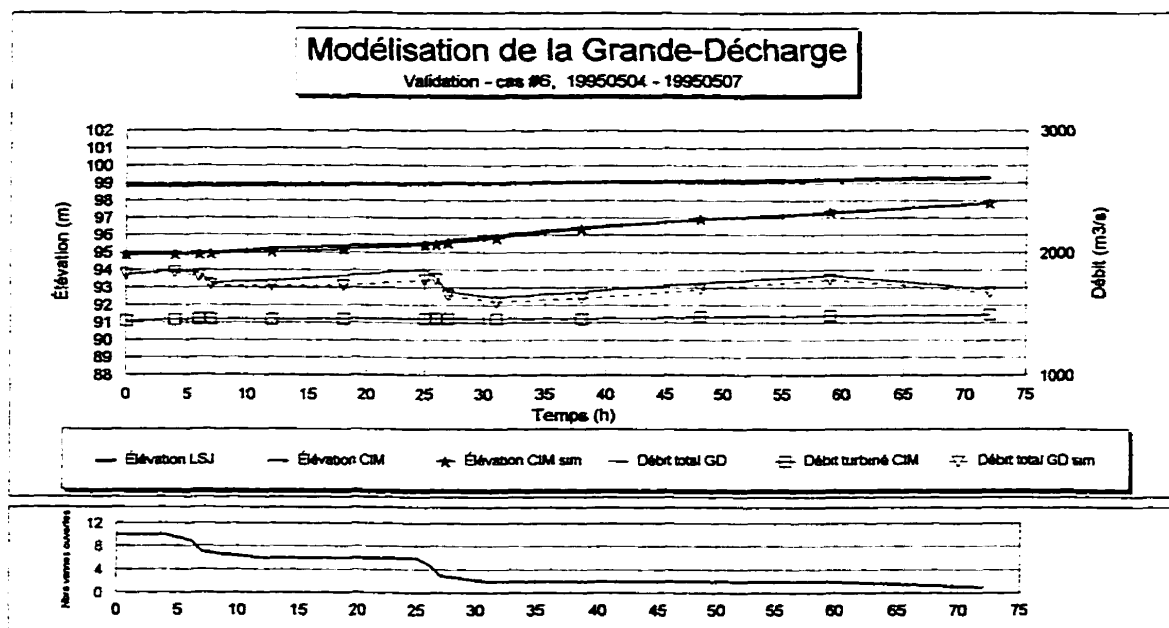


Figure 5.1 Validation cas #6

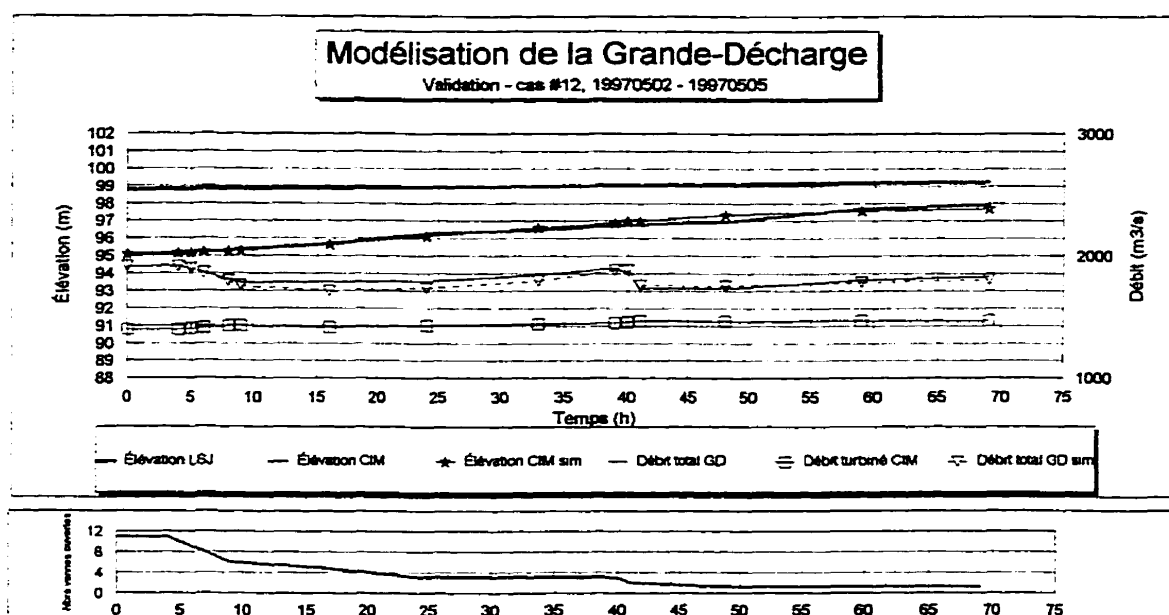


Figure 5.2 Validation cas #12

5.1.2 Validation des cas d'ouverture, quand la perte de charge est importante

Les cas d'ouverture avec perte de charge importante, caractérisés par une hausse du niveau dans la Grande Décharge, sont très bien représentés par le modèle de simulation de la Grande Décharge.

Le cas #11, après avoir simulé 24 heures, a seulement 3 cm d'écart avec la valeur de niveau mesurée ; l'erreur sur le débit sortant de la Grande Décharge n'est alors que de $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Après 48 heures, l'écart entre les niveaux mesuré et simulé est monté à 8 cm avec une différence de débit évacué de $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Enfin, au bout de 72 heures, la différence entre les niveaux mesuré et simulé est de 19 cm et l'erreur sur le débit déversé atteint $6 \text{ m}^3/\text{s}$; en valeur relative, cette variation égale à peine 2% du débit déversé.

La simulation du cas #1 a aussi donné de bons résultats. Après avoir simulé 3 jours, l'écart entre les niveaux mesuré et simulé est de 12 cm ; à 48 heures de simulation, cet écart est de 8 cm, et de 7 cm après 24 heures. Une différence de débit maximale de $54 \text{ m}^3/\text{s}$ est obtenue à la 72^{ème} heure.

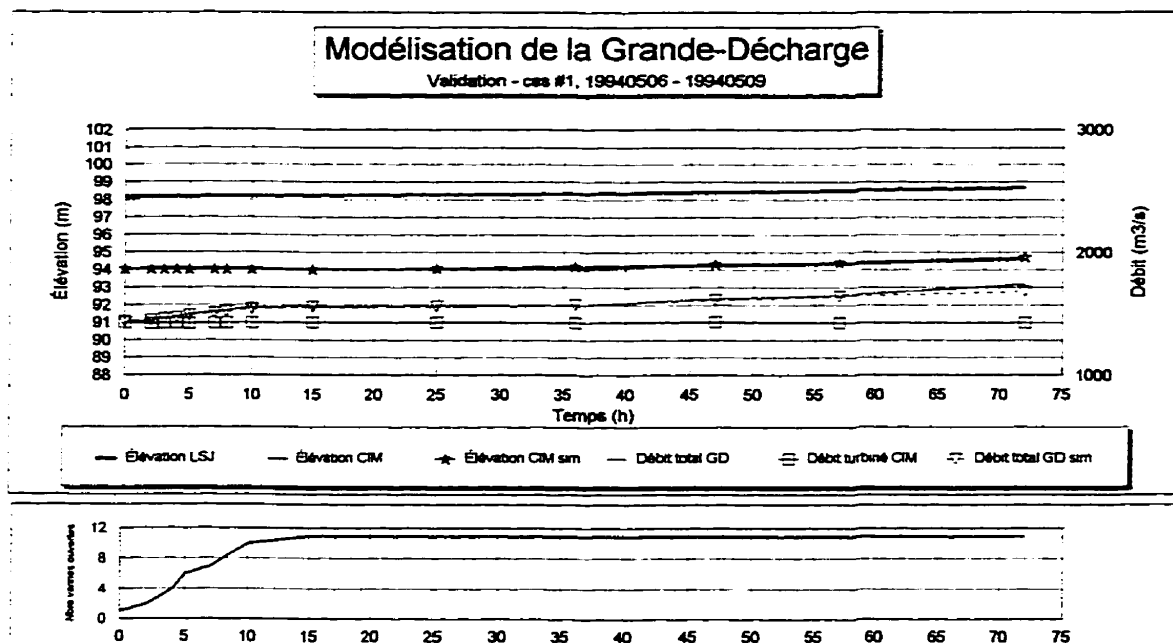


Figure 5.3 Validation cas #1

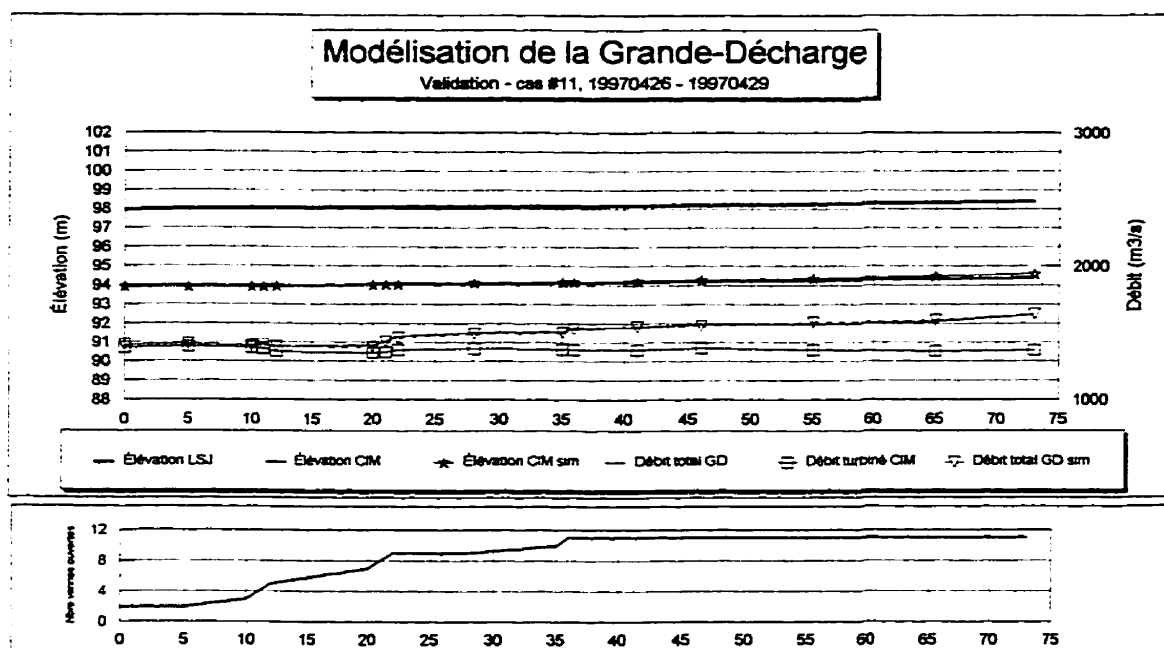


Figure 5.4 Validation cas #11

5.1.3 Validation des cas d'ouverture, quand la perte de charge est faible

La grille actuelle ne permet pas de simuler parfaitement les cas où les pertes de charge sont faibles à l'ouverture. Le modèle actuel, malgré l'utilisation du coefficient de Manning le plus bas (0.001), engendre des pertes de charge trop grandes pour reproduire celles que l'on observe en réalité.

Les cas #3 et #13 démontrent ce problème. Au début de la simulation, l'écart entre les niveaux mesuré et simulé est grand. La différence sur les débits ne se fait pas trop sentir étant donné le nombre restreint de vannes ouvertes. À la première heure de simulation, l'écart entre les débits est très faible parce que le coefficient de débit du modèle est ajusté pour faire sortir le débit mesuré. Ensuite, à mesure que l'on ouvre les vannes, les débits augmentent et l'écart se creuse entre les débits mesurés et simulés. Les niveaux finissent par converger, ce qui amoindrit alors l'écart entre les débits.

Pour ce qui est du cas #13, l'écart maximum entre les débits, soit $262 \text{ m}^3/\text{s}$, est atteint après 18 heures. À ce moment, le débit déversé mesuré est de $1954 \text{ m}^3/\text{s}$ et le débit simulé est de $2216 \text{ m}^3/\text{s}$. La différence de niveau est alors de 10 cm et, comme les 11 vannes sont ouvertes et que le niveau en amont des déversoirs est élevé, le débit l'est aussi, et l'impact d'une différence de niveau se fait sentir davantage dans ce cas. Après 72 heures, les niveaux mesuré et simulé sont à peu près égaux, seulement 1 cm les sépare. L'écart entre les débits est très faible aussi, le débit simulé est $3 \text{ m}^3/\text{s}$ plus grand que celui mesuré.

La simulation du cas #3 a donné des résultats moins performants. Après avoir convergé vers les valeurs mesurées pendant les 10 premières heures, le niveau simulé commence à diverger pour atteindre, après 13 heures, une différence de niveau de 34 cm. Une erreur de $386 \text{ m}^3/\text{s}$ se produit alors sur les débits évacués.

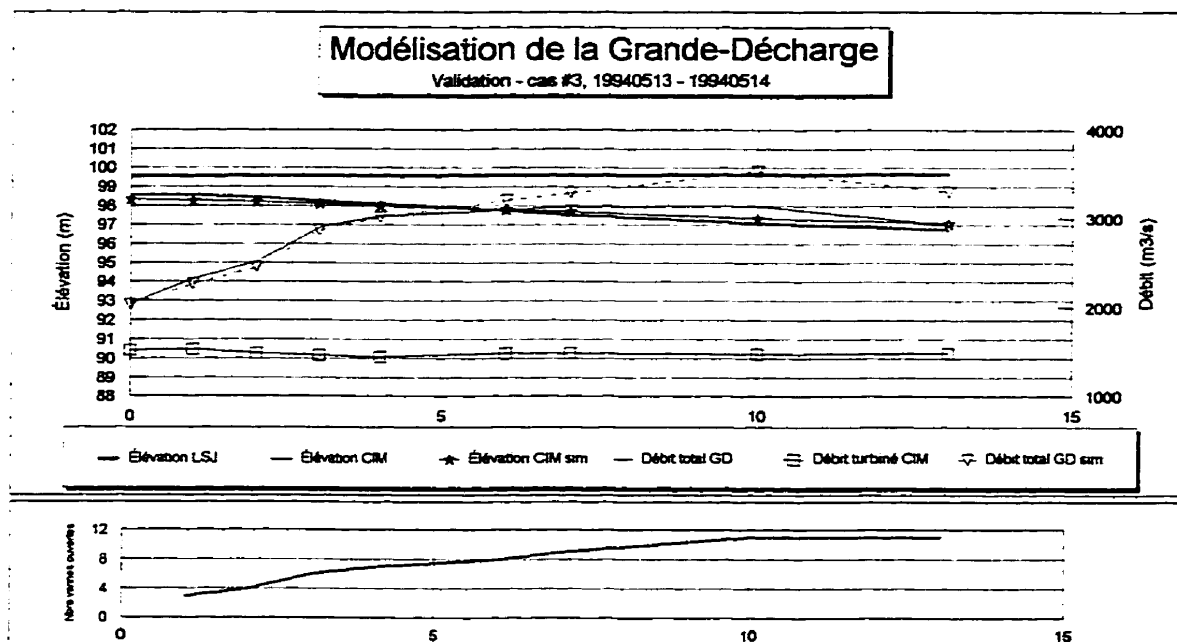


Figure 5.5 Validation cas #3

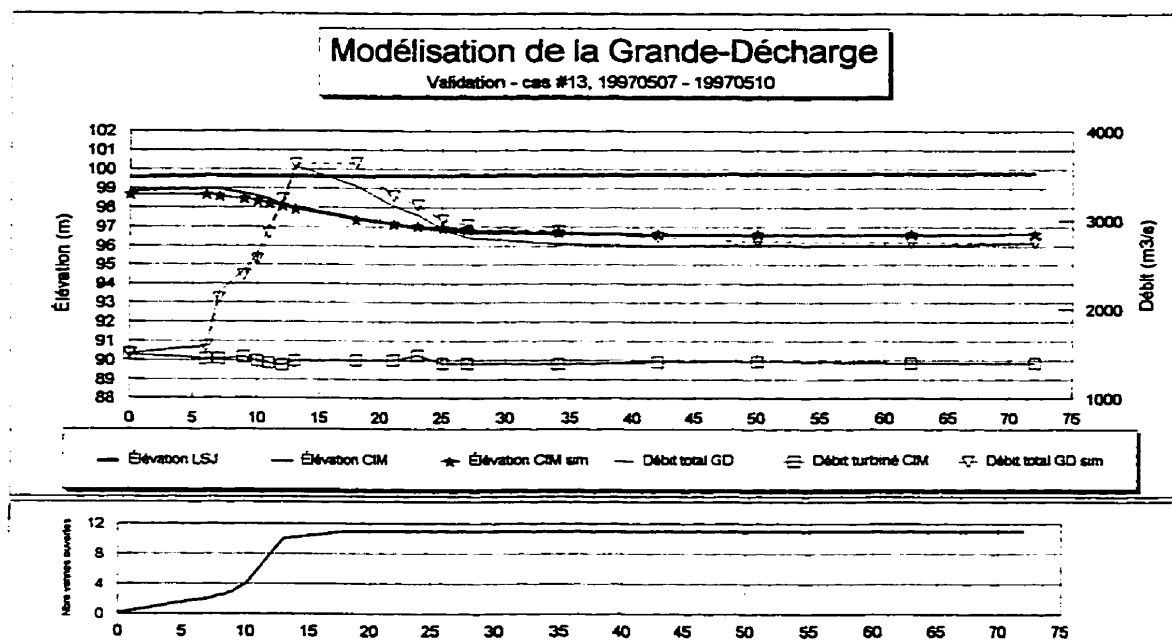


Figure 5.6 Validation cas #13

5.2 Appréciation générale

Sur tous les cas validés, ce sont les cas d'ouverture avec pertes de charge importantes lors de l'ouverture qui donnent les meilleurs résultats. Même après 72 heures simulées, les résultats sont toujours très bons ; l'erreur maximum observée sur les débits est de $54 \text{ m}^3/\text{s}$. Sachant que, pour faire varier le niveau en amont des centrales Shipshaw et Chute-à-Caron d'environ 1cm, un débit de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 heure est nécessaire, la valeur de $54 \text{ m}^3/\text{s}$ observée à la 72^{ième} heure du cas #1 est très faible.

Pour les cas d'ouverture où la perte de charge est faible à l'ouverture, bien que quelques divergences se fassent remarquer en début de simulation, les valeurs de niveaux simulées finissent par converger vers les valeurs mesurées, du moins pour le cas #13.

Les principales opérations effectuées aux ouvrages du complexe Isle-Maligne ont été modélisées, soit l'ouverture et la fermeture de vannes. Pour simuler la perte d'un groupe turbine-alternateur, l'utilisation du modèle qui calcule le Manning dans les cas de fermeture peut s'avérer un bon choix puisque la Grande Décharge devrait réagir à peu près de la même façon qu'une fermeture rapide en haussant rapidement son niveau. Le modèle n'ayant toutefois pas été calibré à partir d'événements semblables, les résultats de simulation devront être interprétés en conséquence.

Le coefficient de Manning ne change pas lors de la simulation d'un écoulement permanent. Pour tenir compte de la montée du lac qui fait diminuer les pertes de charge, une relation pourra être établie entre le coefficient, le niveau du lac et le débit dans la Grande Décharge en utilisant des valeurs déjà obtenues pour le calibrage d'événements permanents et lors de l'établissement des conditions initiales, et de nouvelles à l'aide de l'outil de simulation.

Le modèle n'a pas été validé sur des cas où l'on passait d'une période d'ouverture de vannes à une période de fermeture. Ces cas pourront être testés à l'aide de l'outil de simulation pour vérifier la performance du modèle dans ces conditions.

La validation a été réalisée à partir des mêmes cas qui ont servi au calibrage du modèle de la Grande Décharge ; cette démarche, bien que non souhaitable, a été nécessaire étant donné le nombre limité d'années où des données hydrométriques horaires étaient disponibles. Enfin, l'augmentation du nombre de cas dans la banque de données permettra de mieux calibrer les modèles d'estimation du coefficient de Manning et de valider les modèles existants sur des cas n'ayant pas servi au calibrage.

5.2.1 Source d'erreur

Le modèle de la Grande Décharge a été développé de manière à reproduire le comportement de la Grande Décharge, et à représenter les phénomènes qui se produisent aux limites ou à l'extérieur du domaine d'étude, le plus fidèlement possible. Cependant, certaines simplifications ont été faites pour ne pas alourdir le modèle inutilement et préserver un temps de calcul raisonnable.

D'une part, le modèle actuel ne tient pas compte des apports intermédiaires fournis à la Grande Décharge. Ces faibles apports sont considérés négligeables par rapport à l'important débit fourni par le lac Saint-Jean.

D'autre part, bien qu'en réalité les limites d'une rivière soient mobiles parce qu'elles varient en fonction du niveau de la rivière, le modèle de la Grande Décharge utilise une délimitation fixe du domaine d'étude. Les courbes qui délimitent la rivière ont été établies, comme il a été mentionné précédemment, à partir des cartes marines, sur lesquelles le niveau du lac Saint-Jean est évalué à 100.4 m. Aussi, l'omission des îles dans la modélisation de la Grande Décharge et la représentation de la gorge par un

seuil, rendent schématique la description de la bathymétrie de la Grande Décharge par le modèle. Cette représentation simplifiée de la bathymétrie de la Grande Décharge fait en sorte que le mode de contrôle de la rivière n'est pas reproduit parfaitement et force à faire varier le coefficient de Manning pour recréer les pertes de charge recherchées.

Enfin, une autre source d'erreur peut venir des données historiques utilisées. Les données historiques horaires n'ont pas été validées de façon rigoureuse et peuvent comporter, elles aussi, des erreurs. C'est pourquoi il faut être prudent dans l'interprétation des résultats. Une valeur simulée qui ne colle pas parfaitement aux données mesurées n'est pas nécessairement mauvaise.

5.2.2 Calcul du débit simulé

La différence entre les caractéristiques décrivant un déversoir (coefficient de débit, largeur du déversoir, hauteur du seuil) qui sont appliquées au modèle et celles que l'on retrouve en réalité crée une évolution du débit en fonction du niveau qui diverge en fonction du temps. Étant donné que, sur une séquence donnée, les caractéristiques du modèle restent constantes, le débit simulé ne suit pas la même relation (courbe) que le débit réel. En fait, le calcul du débit simulé sous-estime la capacité d'évacuation des déversoirs de la Grande Décharge. C'est pourquoi, même si les niveaux simulés et mesurés suivent la même courbe, la valeur des débits déversés aux déversoirs ne sera pas la même dans les deux cas.

Le débit simulé peut donc être recalculé à partir du niveau simulé en utilisant les mêmes coefficients de débit qu'utilise la compagnie Alcan pour ses déversoirs. Ceci améliore les résultats dans certains cas.

- Si niveau simulé > niveau mesuré, alors l'utilisation des relations réelles pour calculer le débit déversé donne de moins bons résultats que ceux fournis directement par le modèle.
- Si niveau simulé < niveau mesuré, alors l'utilisation des relations réelles pour calculer le débit déversé donne de meilleurs résultats que ceux fournis directement par le modèle.

L'estimation du débit à partir des relations réelles est souvent meilleure quand la durée d'une séquence est longue, puisque la précision du débit est alors indépendante de la durée de la séquence.

Enfin, les cas de fermeture pourraient bénéficier du calcul du débit à partir des vraies relations aux déversoirs. Dans les deux cas, le niveau simulé a été sous-estimé, ce qui entraîne une sous-estimation importante des débits déversés. Le tableau, fourni en annexe 5, présente la valeur du débit déversé calculée à partir de la relation réelle du déversoir et la valeur du débit fournie par le modèle.

Pour la construction d'un nouveau modèle, il serait intéressant de le calibrer en prenant soin de recalculer le coefficient de débit à chaque heure. Ainsi, on élimine la divergence reliée au temps de la séquence. Cette façon de faire ne peut cependant pas être intégrée au modèle actuel puisque cela nécessiterait de calibrer à nouveau le modèle.

CONCLUSION

L'objectif principal du projet était de fournir un outil capable de prévoir les niveaux et débits dans la Grande Décharge en supposant des opérations à effectuer aux ouvrages du complexe Isle-Maligne, dans le but de faciliter ou améliorer la gestion hydrique en temps réel, pour les complexes hydroélectriques d'Isle-Maligne, Shipshaw et Chute-à-Caron.

Une analyse des données hydrométriques horaires, sur la période printanière des années 1994 à 1997, a permis de bien comprendre la dynamique de la Grande Décharge et de se familiariser avec le type de gestion hydrique effectuée au complexe Isle-Maligne et au lac Saint-Jean en cette période de l'année. À partir du logiciel de simulation hydrodynamique bidimensionnel TASE/SWAN Plus, un modèle numérique de la Grande Décharge a été développé pour permettre de recréer, dans un laps de temps relativement faible, les écoulements de la Grande Décharge en régimes permanent et transitoire. Des modèles servant à calculer le coefficient de Manning complètent le modèle de la Grande Décharge. Enfin, pour automatiser l'utilisation du modèle sans avoir à utiliser le logiciel TASE/SWAN Plus, une interface graphique a été conçue à cette fin.

Le modèle de la Grande Décharge permet de reproduire les modifications des conditions d'écoulement occasionnées par des changements opérationnels aux ouvrages du complexe Isle-Maligne. L'utilisateur n'a qu'à fournir au modèle, à l'aide de l'interface, les conditions initiales de l'événement de simulation, les opérations prévues aux différents déversoirs, la prévision des débits turbinés et l'évolution du lac Saint-Jean anticipée. Ensuite, toutes les variables nécessaires à l'exécution du programme se calculent automatiquement et, selon que l'on procède à l'ouverture ou à la fermeture de vannes, le calcul du coefficient de Manning approprié est effectué.

Certains types d'événements restent à être validés, par exemple la perte d'un groupe turbine-alternateur ou le passage d'un événement d'ouverture à un événement de fermeture. L'interface graphique développée facilitera le travail et permettra de compléter l'analyse de performance du modèle de façon moins fastidieuse.

Le modèle a été développé avec le souci de minimiser le temps de calcul. Pour ce faire, plusieurs simplifications ont été apportées au modèle ce qui a entraîné des sources d'erreurs potentielles. Entre autres, les limites de la rivière sont fixes, la bathymétrie de la Grande Décharge est représentée schématiquement et les apports intermédiaires ne sont pas considérés.

La principale source d'erreur du modèle est le manque de précision dans la représentation de la bathymétrie de la Grande Décharge. La venue d'ordinateurs plus puissants permettra l'utilisation d'une grille plus dense sans augmenter le temps de calcul. Ainsi, le modèle aurait la possibilité de représenter la bathymétrie plus précisément ; il serait donc en mesure de mieux recréer le mode de contrôle réel de la gorge et permettrait de rendre le modèle moins sensible au coefficient de Manning. L'utilisation d'une nouvelle grille pourrait aussi permettre de mieux reproduire les cas où la perte de charge est faible.

TASE/SWAN Plus permet, dans sa nouvelle version, l'utilisation de l'option couvrant-découvrant qui rend possible l'abaissement du niveau d'eau jusqu'à un assèchement de zones du domaine d'étude, ce qui rend les limites de la rivière mobiles. Cette option, pour être utile, nécessite une discrétisation du domaine assez fine.

L'algorithme du modèle permet qu'il soit utilisé en temps réel, continuellement. Par exemple, le modèle (l'utilitaire) pourrait avoir accès à la banque de données hydrométriques et, en rendant l'acquisition de données automatique, le modèle aurait

la possibilité de se tenir à jour sur les conditions de la Grande Décharge et de se corriger à des intervalles de temps réguliers.

Les résultats obtenus jusqu'à maintenant laissent croire que la gestion hydrique d'un complexe hydroélectrique ou d'un cours d'eau aménagé peut être grandement facilitée et améliorée par l'utilisation de la modélisation hydrodynamique.

BIBLIOGRAPHIE

ACRES INTERNATIONAL " Grande décharge gorge – Channel mprovement study ", Document fourni pour la compagnie Société d'électrolyse et de chimie Alcan, Juillet 1985

DESLAURIERS, M., PERRON, G., THOMPSTONE, R. " Etude concernant la perte de charge due à l'engorgement sur la rivière Grande Décharge ", Rapport interne de la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, Rapport numéro: 80-21, Septembre 1980

DEVRIES, J., HROMADKA, T.V. " Computer models for surface water ", Handbook of Hydrology, Chapitre 21

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE " Modélisation des crues et des inondations à l'aide du logiciel TELEMATAC ", Direction des études et recherche, Chatou, France, 1994

FORTIN, A. " Analyse numérique pour ingénieurs ", Édition de l'École Polytechnique de Montréal, 1995

FRENCH, R. " Open-Channel Hydraulics ", Mc Graw Hill Publishing Company, New-York, 1985

FRENETTE, M., " Hydraulique des cours d'eau ", Document du cours GCI-15201, Université Laval, Département de génie civil, Faculté des sciences et de génie, Janvier 1993

GEORGE KANAKIS JR, ROBERT A. LAURA . " Real-Time Flow Forecasting on the Saluda River Watershed ", Waterpower, Proceedings of the International Conference on Hydropower, Tennessee, 1993

LAVALLÉE D., MARCHE C., THERRIEN F. " Un simulateur d'écoulement en temps réel comme aide à la prévision et à la gestion des rivières.", Montréal, 1998

LECLERC, M., BELLEMARE, J.-F., TRUSSARD, S., " Simulation hydrodynamique de l'estuaire supérieur du fleuve Saint-Laurent avec un modèle aux éléments finis couvrant-découvrant ", Revue canadienne de génie civil, Volume 17, p.739-751, 1990

LECLERC, M., DHATT, G., ROBERT, J.-L., ... " Modélisation des écoulements de l'archipel de Montréal par éléments finis: aspects divers de l'application ", Revue internationale des sciences de l'eau, Volume 3, no 2, p.41-56, mai 1987

ROBERT, J.-L., HAMED, M.H. " Introduction des conditions réelles de débit aux limites d'un modèle hydrodynamique ", Revue canadienne de génie civil, Volume 22, p.1133-1142, 1995

ROBITAILLE A., WELT F., LAFOND L. " Developpement of a Real Time River Management System for Hydro-Québec's Short Term Operation ", Waterpower, Proceedings of the International Conference on Hydropower, Tennessee, 1995

SNC – SHAWINIGAN INC. " Évaluation des conditions d'écoulement à Isle-Maligne pour des niveaux extrêmes du Lac Saint-Jean ", Document fourni pour la compagnie Société d'électrolyse et de chimie Alcan, Septembre 1994

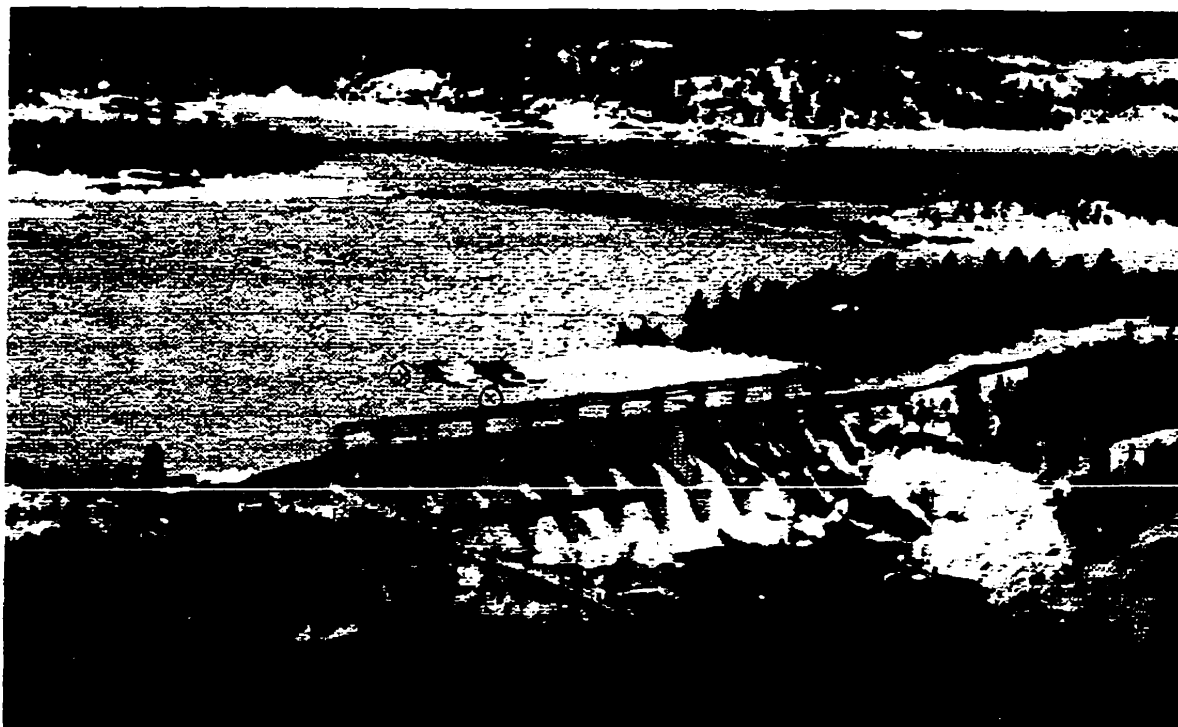
SOCIÉTÉ D'ÉLECTROLYSE ET DE CHIMIE ALCAN LTÉE. " Les caractéristiques Physiques et Hydrauliques du Système Hydroélectrique de l'Alcan au Saguenay ", Document interne

SOCIÉTÉ D'ÉLECTROLYSE ET DE CHIMIE ALCAN LTÉE. " Relation Débit dans la Grande Décharge et Niveau du Lac St-Jean ", Document interne

TASE SOFTWARE CORPORATION INC. " TASE / SWAN Plus version 3.0 – Shallow Water Analysis by Numerical Method – User's Guide ", Technologie Advanced Software for Engineering, 1994

UNVER, O., LANSEY, K. " Real-Time Flood Management Model for Highland Lake System ", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.113, No.5, p. 620-638, 1987

ANNEXE I : Localisation des jauges



Localisation des jauges au déversoir #4

ANNEXE II : Courbes Alcan et échantillons

Courbes reliant le débit total à la Grande Décharge et la perte de charge entre l'exutoire du lac Saint-Jean et le bief amont d'Isle-Maligne, pour différentes élévations du lac.

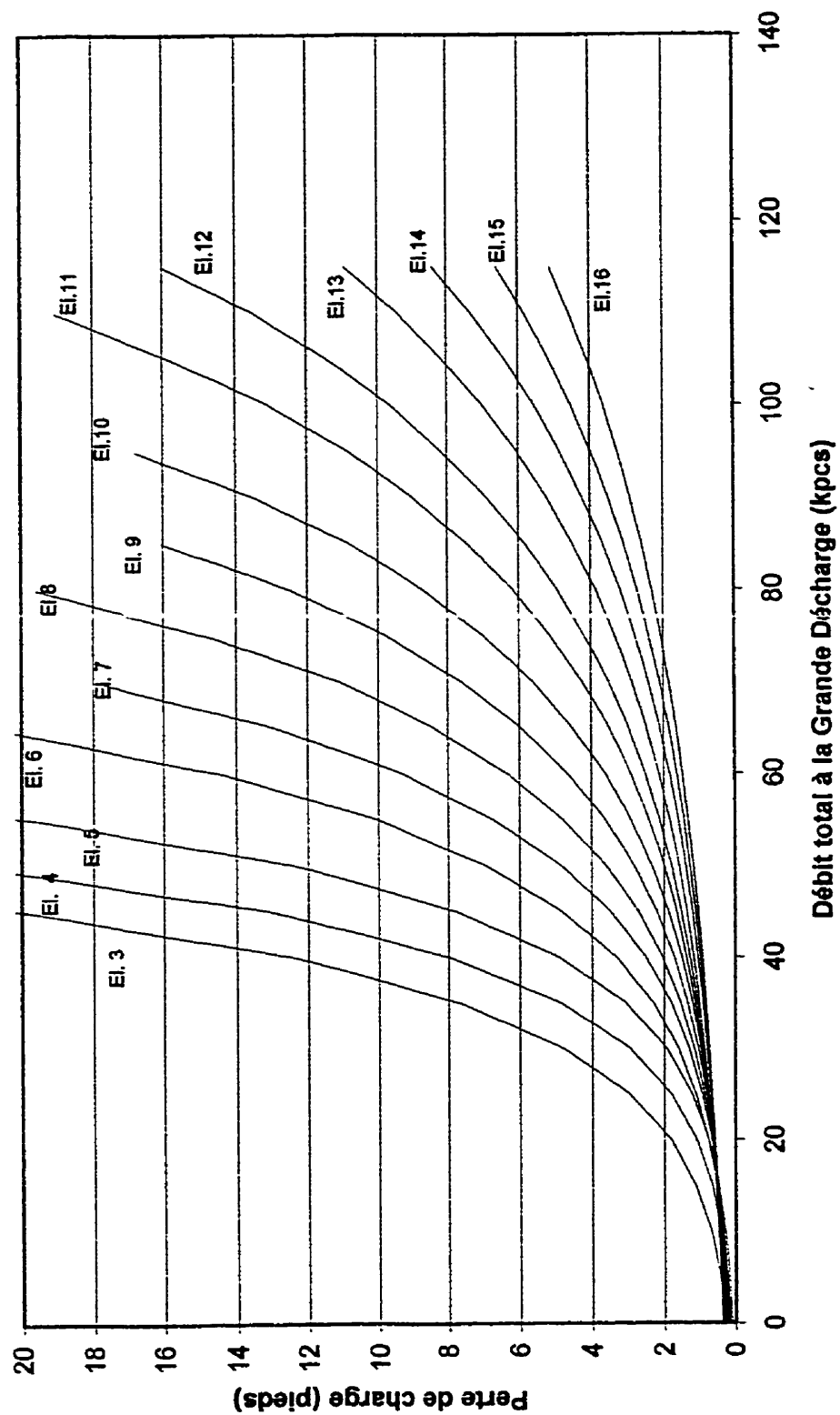


Tableau des échantillons sélectionnés pour représenter l'état permanent

| échantillons | Date | LSJ max | LSJ med | LSJ min | IM_am max | IM_am med | IM_am min | Débit max | Débit med | Débit min | delH moy | delH med | temps (h) | indice p. |
|--------------|-----------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| | 1996 | (m) | (m) | (m) | (m) | (m) | (m) | mcs | mcs | mcs | (m) | (m) | (h) | |
| 1 | 0315-0315 | 98,31 | 98,29 | 98,28 | 97,14 | 97,09 | 97,06 | 1276 | 1272 | 1156 | 1,20 | 1,21 | 17 | 26,11 |
| 2 | 0315-0318 | 98,28 | 98,21 | 98,14 | 97,07 | 96,60 | 96,26 | 1434 | 1412 | 1342 | 1,62 | 1,61 | 65 | 12,49 |
| 3 | 0318-0327 | 98,14 | 97,99 | 97,83 | 96,77 | 96,56 | 95,90 | 1241 | 1223 | 1191 | 1,49 | 1,42 | 213 | 0,78 |
| 4 | 0327-0330 | 97,82 | 97,77 | 97,74 | 95,91 | 95,88 | 95,83 | 1190 | 1181 | 1124 | 1,80 | 1,89 | 72 | 0,86 |
| 5 | 0330-0402 | 97,74 | 97,72 | 97,70 | 96,14 | 96,14 | 96,03 | 1068 | 1049 | 1023 | 1,59 | 1,58 | 81 | 0,72 |
| 6 | 0402-0407 | 97,71 | 97,70 | 97,68 | 96,84 | 96,81 | 96,14 | 1088 | 901 | 782 | 1,00 | 0,89 | 111 | 19,30 |
| 7 | 0407-0409 | 97,71 | 97,70 | 97,69 | 96,67 | 96,67 | 96,18 | 1070 | 1026 | 988 | 1,11 | 1,03 | 49 | 16,31 |
| 8 | 0409-0415 | 97,69 | 97,58 | 97,49 | 96,02 | 95,28 | 93,99 | 1196 | 1145 | 1114 | 2,45 | 2,31 | 152 | 6,29 |
| 9 | 0415-0416 | 97,50 | 97,49 | 97,49 | 94,25 | 93,99 | 93,93 | 1106 | 1081 | 1062 | 3,50 | 3,50 | 24 | 22,61 |
| 10 | 0416-0421 | 97,62 | 97,52 | 97,49 | 94,25 | 94,03 | 93,89 | 1186 | 1131 | 1098 | 3,49 | 3,49 | 103 | 2,64 |
| 11 | 0421-0423 | 97,85 | 97,71 | 97,60 | 94,07 | 93,99 | 93,89 | 1318 | 1263 | 1200 | 3,73 | 3,71 | 56 | 5,36 |
| 12 | 0423-0426 | 98,40 | 98,13 | 97,85 | 94,55 | 93,86 | 93,78 | 1479 | 1451 | 1404 | 4,17 | 4,21 | 72 | 7,68 |
| 13 | 0427-0429 | 98,84 | 98,70 | 98,48 | 95,11 | 94,82 | 94,63 | 1909 | 1801 | 1741 | 3,82 | 3,84 | 64 | 10,93 |
| 14 | 0429-0430 | 98,97 | 98,91 | 98,85 | 95,81 | 95,60 | 95,13 | 1878 | 1833 | 1724 | 3,37 | 3,31 | 27 | 78,37 |
| 15 | 0430-0501 | 99,05 | 99,02 | 98,98 | 96,21 | 96,02 | 95,89 | 1974 | 1925 | 1892 | 3,00 | 3,00 | 20 | 34,09 |
| 16 | 0501-0503 | 99,31 | 99,16 | 98,06 | 97,63 | 97,18 | 96,21 | 1909 | 1835 | 1693 | 2,08 | 1,98 | 47 | 75,67 |
| 17 | 0503-0505 | 99,63 | 99,48 | 99,32 | 98,62 | 98,32 | 97,72 | 1816 | 1774 | 1722 | 1,19 | 1,15 | 51 | 18,33 |
| 18 | 0505-0510 | 100,03 | 99,90 | 99,63 | 99,38 | 99,20 | 98,62 | 1695 | 1673 | 1657 | 0,73 | 0,70 | 113 | 1,35 |
| 19 | 0510-0523 | 101,33 | 100,63 | 100,03 | 101,01 | 100,20 | 99,39 | 1608 | 1585 | 1448 | 0,43 | 0,42 | 316 | 1,64 |
| 20 | 0523-0527 | 101,42 | 101,40 | 101,33 | 101,01 | 100,80 | 100,69 | 2780 | 2729 | 2108 | 0,58 | 0,59 | 95 | 8,73 |
| 21 | 0527-0615 | 101,50 | 101,46 | 101,40 | 101,24 | 101,15 | 100,99 | 1625 | 1593 | 1431 | 0,30 | 0,29 | 466 | 0,14 |
| 1995 | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 0315-0316 | 98,57 | 98,55 | 98,53 | 97,77 | 97,61 | 97,55 | 1291 | 1285 | 1277 | 0,92 | 0,94 | 35 | 1,96 |
| 23 | 0316-0316 | 98,52 | 98,51 | 98,51 | 97,67 | 97,65 | 97,57 | 1171 | 1164 | 1163 | 0,89 | 0,86 | 11 | 5,68 |
| 24 | 0316-0320 | 98,51 | 98,45 | 98,41 | 97,88 | 97,45 | 97,31 | 1309 | 1291 | 1274 | 1,01 | 1,01 | 89 | 1,27 |
| 25 | 0320-0322 | 98,41 | 98,40 | 98,40 | 97,37 | 97,30 | 97,27 | 1281 | 1272 | 1264 | 1,10 | 1,10 | 41 | 0,80 |
| 26 | 0322-0327 | 98,41 | 98,39 | 98,37 | 97,28 | 96,85 | 96,79 | 1524 | 1390 | 1339 | 1,49 | 1,54 | 118 | 4,69 |
| 27 | 0323-0327 | 98,40 | 98,39 | 98,37 | 96,87 | 96,84 | 96,79 | 1398 | 1389 | 1384 | 1,55 | 1,55 | 81 | 0,12 |
| 28 | 0327-0328 | 98,37 | 98,36 | 98,35 | 96,96 | 96,92 | 96,85 | 1395 | 1389 | 1387 | 1,45 | 1,45 | 14 | 3,23 |
| 29 | 0328-0329 | 98,34 | 98,33 | 98,32 | 96,88 | 96,71 | 96,59 | 1533 | 1520 | 1501 | 1,60 | 1,62 | 12 | 42,40 |
| 30 | 0329-0330 | 98,32 | 98,31 | 98,29 | 96,56 | 96,55 | 96,37 | 1506 | 1394 | 1378 | 1,82 | 1,76 | 36 | 13,47 |
| 31 | 0330-0331 | 98,29 | 98,29 | 98,28 | 96,35 | 96,24 | 96,14 | 1515 | 1512 | 1509 | 2,04 | 2,05 | 12 | 5,79 |
| 32 | 0331-0403 | 98,25 | 98,21 | 98,17 | 96,30 | 95,64 | 95,18 | 1531 | 1497 | 1474 | 2,53 | 2,57 | 63 | 10,74 |
| 33 | 0403-0409 | 98,19 | 98,05 | 97,96 | 95,15 | 94,13 | 93,75 | 1484 | 1458 | 1369 | 3,79 | 3,92 | 139 | 5,72 |
| 34 | 0409-0420 | 97,96 | 97,89 | 97,86 | 93,94 | 93,83 | 93,74 | 1336 | 1306 | 1258 | 4,08 | 4,07 | 258 | 0,18 |
| 35 | 0420-0421 | 97,97 | 97,95 | 97,92 | 93,88 | 93,84 | 93,76 | 1405 | 1396 | 1382 | 4,11 | 4,11 | 34 | 1,71 |
| 36 | 0421-0421 | 97,98 | 97,98 | 97,97 | 93,80 | 93,78 | 93,75 | 1370 | 1342 | 1326 | 4,20 | 4,20 | 12 | 11,38 |
| 37 | 0421-0422 | 98,03 | 98,01 | 97,98 | 93,85 | 93,81 | 93,79 | 1402 | 1397 | 1383 | 4,19 | 4,19 | 24 | 1,42 |
| 38 | 0422-0426 | 98,20 | 98,13 | 98,03 | 93,98 | 93,84 | 93,81 | 1433 | 1429 | 1420 | 4,27 | 4,28 | 84 | 0,22 |
| 39 | 0426-0426 | 98,22 | 98,21 | 98,20 | 94,05 | 94,02 | 93,99 | 1493 | 1442 | 1424 | 4,20 | 4,19 | 12 | 19,94 |
| 40 | 0426-0501 | 98,42 | 98,32 | 98,22 | 94,23 | 94,05 | 94,00 | 1598 | 1557 | 1510 | 4,24 | 4,24 | 98 | 1,35 |
| 41 | 0501-0502 | 98,58 | 98,48 | 98,42 | 94,50 | 94,37 | 94,26 | 1680 | 1651 | 1617 | 4,12 | 4,11 | 42 | 5,19 |
| 42 | 0502-0505 | 98,98 | 98,77 | 98,58 | 95,57 | 94,83 | 94,52 | 1865 | 1777 | 1704 | 3,88 | 3,96 | 69 | 19,98 |
| 43 | 0505-0506 | 99,08 | 99,04 | 98,99 | 96,52 | 96,15 | 95,70 | 1700 | 1660 | 1608 | 2,91 | 2,90 | 14 | 231,87 |
| 44 | 0506-0507 | 99,21 | 99,15 | 99,08 | 97,29 | 96,98 | 96,56 | 1813 | 1773 | 1721 | 2,18 | 2,16 | 19 | 104,93 |
| 45 | 0507-0508 | 99,47 | 99,36 | 99,21 | 98,33 | 98,07 | 97,33 | 1762 | 1724 | 1663 | 1,36 | 1,29 | 43 | 31,06 |
| 46 | 0508-0509 | 99,55 | 99,52 | 99,48 | 98,74 | 98,58 | 98,38 | 1546 | 1526 | 1514 | 0,98 | 0,96 | 14 | 38,53 |
| 47 | 0509-0511 | 99,81 | 99,68 | 99,56 | 98,95 | 98,72 | 98,64 | 1800 | 1785 | 1714 | 0,95 | 0,97 | 55 | 4,94 |
| 48 | 0511-0512 | 99,92 | 99,88 | 99,82 | 99,13 | 99,08 | 99,06 | 1737 | 1734 | 1731 | 0,78 | 0,79 | 18 | 0,75 |
| 49 | 0513-0516 | 100,20 | 100,07 | 99,98 | 98,90 | 96,71 | 96,67 | 3039 | 2900 | 2817 | 3,34 | 3,36 | 70 | 3,59 |
| 50 | 0516-0517 | 100,38 | 100,30 | 100,21 | 97,05 | 96,97 | 96,90 | 3196 | 3129 | 3018 | 3,31 | 3,31 | 38 | 5,91 |
| 51 | 0517-0518 | 100,59 | 100,50 | 100,39 | 97,30 | 97,19 | 97,07 | 3476 | 3323 | 3217 | 3,32 | 3,32 | 24 | 31,12 |
| 52 | 0518-0520 | 100,84 | 100,73 | 100,59 | 97,38 | 97,30 | 97,24 | 3749 | 3641 | 3512 | 3,42 | 3,42 | 45 | 4,50 |
| 53 | 0520-0524 | 101,08 | 100,99 | 100,85 | 98,05 | 97,56 | 97,41 | 3995 | 3890 | 3757 | 3,38 | 3,44 | 89 | 4,94 |

Tableau des échantillons sélectionnés pour représenter l'état permanent (suite)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|-----|---------|
| 54 | 0524-0526 | 101,23 | 101,18 | 101,11 | 100,28 | 100,20 | 100,02 | 2861 | 2821 | 2744 | 0,99 | 0,97 | 34 | 9,33 |
| 55 | 0528-0529 | 101,37 | 101,32 | 101,23 | 100,68 | 100,63 | 100,33 | 2507 | 2481 | 2418 | 0,71 | 0,70 | 73 | 2,36 |
| 56 | 0529-0531 | 101,39 | 101,37 | 101,35 | 100,71 | 100,70 | 100,68 | 2526 | 2489 | 2486 | 0,68 | 0,68 | 45 | 0,40 |
| 57 | 0531-0601 | 101,38 | 101,37 | 101,36 | 100,90 | 100,88 | 100,70 | 2038 | 2036 | 2021 | 0,51 | 0,49 | 24 | 2,90 |
| 58 | 0601-0606 | 101,52 | 101,48 | 101,38 | 101,25 | 101,19 | 100,97 | 1577 | 1562 | 1425 | 0,30 | 0,30 | 120 | 1,89 |
| 59 | 0606-0615 | 101,54 | 101,49 | 101,46 | 101,26 | 101,20 | 101,16 | 1585 | 1567 | 1408 | 0,29 | 0,29 | 224 | 0,23 |
| 1994 | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | 0315-0316 | 98,51 | 98,48 | 98,46 | 97,50 | 97,44 | 97,37 | 1300 | 1277 | 1263 | 1,05 | 1,05 | 33 | 3,46 |
| 61 | 0316-0317 | 98,44 | 98,43 | 98,41 | 97,47 | 97,42 | 97,34 | 1278 | 1269 | 1265 | 1,02 | 1,01 | 17 | 4,61 |
| 62 | 0317-0321 | 98,39 | 98,31 | 98,22 | 97,28 | 97,10 | 96,93 | 1283 | 1268 | 1256 | 1,19 | 1,20 | 84 | 1,06 |
| 63 | 0321-0324 | 98,21 | 98,16 | 98,11 | 97,11 | 97,07 | 96,98 | 1166 | 1162 | 1131 | 1,10 | 1,09 | 69 | 0,82 |
| 64 | 0326-0331 | 98,05 | 97,94 | 97,80 | 96,89 | 96,01 | 95,36 | 1275 | 1249 | 1235 | 1,91 | 1,94 | 134 | 2,73 |
| 65 | 0401-0404 | 97,78 | 97,72 | 97,68 | 95,12 | 94,66 | 94,32 | 1306 | 1280 | 1251 | 3,04 | 3,06 | 63 | 8,66 |
| 66 | 0404-0405 | 97,68 | 97,65 | 97,62 | 94,30 | 94,25 | 94,15 | 1200 | 1197 | 1184 | 3,41 | 3,40 | 39 | 1,32 |
| 67 | 0405-0406 | 97,62 | 97,60 | 97,60 | 94,17 | 94,17 | 94,14 | 1158 | 1149 | 1146 | 3,44 | 3,43 | 21 | 0,71 |
| 68 | 0406-0411 | 97,60 | 97,51 | 97,46 | 94,40 | 94,31 | 94,03 | 1121 | 1104 | 1095 | 3,25 | 3,24 | 117 | 0,64 |
| 69 | 0411-0413 | 97,45 | 97,42 | 97,40 | 94,31 | 94,16 | 94,03 | 1061 | 1030 | 1017 | 3,23 | 3,26 | 39 | 7,86 |
| 70 | 0413-0415 | 97,40 | 97,39 | 97,38 | 94,51 | 94,47 | 94,32 | 1093 | 1057 | 1002 | 2,93 | 2,92 | 56 | 5,22 |
| 71 | 0415-0417 | 97,44 | 97,41 | 97,38 | 94,29 | 93,92 | 93,66 | 1191 | 1167 | 1138 | 3,47 | 3,49 | 44 | 14,78 |
| 72 | 0417-0418 | 97,46 | 97,46 | 97,45 | 93,75 | 93,72 | 93,69 | 1195 | 1112 | 1090 | 3,74 | 3,74 | 13 | 33,52 |
| 73 | 0418-0418 | 97,48 | 97,48 | 97,47 | 93,74 | 93,73 | 93,71 | 1162 | 1143 | 1118 | 3,74 | 3,75 | 16 | 4,51 |
| 74 | 0419-0421 | 97,62 | 97,59 | 97,54 | 93,90 | 93,86 | 93,82 | 1191 | 1159 | 1144 | 3,72 | 3,72 | 42 | 1,84 |
| 75 | 0421-0422 | 97,67 | 97,65 | 97,62 | 93,93 | 93,79 | 93,71 | 1263 | 1254 | 1210 | 3,84 | 3,86 | 28 | 11,86 |
| 76 | 0422-0424 | 97,73 | 97,70 | 97,66 | 93,80 | 93,73 | 93,71 | 1204 | 1200 | 1189 | 3,96 | 3,97 | 45 | 0,56 |
| 77 | 0424-0430 | 97,85 | 97,78 | 97,72 | 93,83 | 93,75 | 93,69 | 1331 | 1287 | 1242 | 4,03 | 4,03 | 128 | 0,59 |
| 78 | 0501-0501 | 97,90 | 97,89 | 97,88 | 93,82 | 93,80 | 93,73 | 1319 | 1316 | 1277 | 4,38 | 4,10 | 16 | 11,22 |
| 79 | 0501-0506 | 98,15 | 98,00 | 97,91 | 94,03 | 93,78 | 93,66 | 1466 | 1424 | 1366 | 4,23 | 4,28 | 114 | 2,00 |
| 80 | 0506-0507 | 98,35 | 98,25 | 98,15 | 94,09 | 94,04 | 94,01 | 1569 | 1555 | 1435 | 4,21 | 4,23 | 35 | 5,63 |
| 81 | 0508-0509 | 98,61 | 98,50 | 98,39 | 94,45 | 94,24 | 94,12 | 1680 | 1629 | 1580 | 4,21 | 4,22 | 28 | 25,84 |
| 82 | 0509-0511 | 99,09 | 98,87 | 98,62 | 95,64 | 94,92 | 94,52 | 1927 | 1810 | 1714 | 3,85 | 3,95 | 58 | 39,18 |
| 83 | 0512-0512 | 99,37 | 99,27 | 99,18 | 97,91 | 97,51 | 97,00 | 1814 | 1777 | 1733 | 1,79 | 1,76 | 21 | 94,06 |
| 84 | 0513-0513 | 99,55 | 99,46 | 99,38 | 98,56 | 98,39 | 97,96 | 1694 | 1684 | 1659 | 1,12 | 1,07 | 19 | 34,54 |
| 85 | 0513-0514 | 99,69 | 99,65 | 99,59 | 98,26 | 97,00 | 96,50 | 3368 | 3015 | 2616 | 2,48 | 2,65 | 16 | 1714,76 |
| 86 | 0514-0515 | 99,83 | 99,77 | 99,71 | 98,04 | 97,37 | 96,66 | 2291 | 2176 | 2014 | 2,35 | 2,40 | 23 | 332,08 |
| 87 | 0515-0516 | 99,93 | 99,88 | 99,83 | 98,76 | 98,56 | 98,10 | 2085 | 2053 | 1961 | 1,42 | 1,35 | 21 | 90,39 |
| 88 | 0516-0517 | 100,04 | 99,99 | 99,94 | 98,90 | 98,88 | 98,87 | 1765 | 1664 | 1606 | 1,10 | 1,11 | 19 | 7,94 |
| 89 | 0517-0518 | 100,22 | 100,13 | 100,05 | 99,62 | 99,49 | 99,40 | 1645 | 1642 | 1589 | 0,63 | 0,63 | 30 | 8,34 |
| 90 | 0518-0519 | 100,34 | 100,28 | 100,23 | 99,85 | 99,73 | 99,62 | 1586 | 1555 | 1545 | 0,55 | 0,54 | 20 | 15,16 |
| 91 | 0519-0527 | 101,27 | 100,96 | 100,38 | 100,93 | 100,54 | 99,83 | 1631 | 1577 | 1551 | 0,42 | 0,39 | 185 | 1,63 |
| 92 | 0527-0527 | 101,31 | 101,30 | 101,28 | 101,01 | 101,01 | 100,97 | 1467 | 1462 | 1449 | 0,30 | 0,30 | 16 | 1,92 |
| 93 | 0528-0602 | 101,47 | 101,35 | 101,31 | 101,14 | 101,02 | 100,98 | 1632 | 1607 | 1582 | 0,34 | 0,34 | 135 | 0,27 |
| 94 | 0602-0603 | 101,48 | 101,47 | 101,47 | 100,91 | 100,73 | 100,73 | 2953 | 2765 | 2703 | 0,72 | 0,74 | 22 | 33,63 |
| 95 | 0603-0604 | 101,48 | 101,47 | 101,47 | 100,86 | 100,60 | 100,59 | 2929 | 2896 | 2888 | 0,87 | 0,87 | 15 | 4,40 |
| 96 | 0604-0604 | 101,47 | 101,47 | 101,47 | 100,82 | 100,77 | 100,59 | 2547 | 2519 | 2478 | 0,73 | 0,70 | 11 | 52,07 |
| 97 | 0604-0605 | 101,48 | 101,47 | 101,47 | 100,94 | 100,93 | 100,85 | 2272 | 2266 | 2213 | 0,56 | 0,55 | 15 | 10,41 |
| 98 | 0605-0606 | 101,49 | 101,49 | 101,48 | 101,09 | 101,08 | 100,99 | 1900 | 1895 | 1886 | 0,43 | 0,41 | 22 | 1,53 |
| 99 | 0606-0607 | 101,50 | 101,50 | 101,49 | 101,17 | 101,15 | 101,07 | 1729 | 1719 | 1680 | 0,37 | 0,35 | 24 | 4,95 |
| 100 | 0607-0615 | 101,51 | 101,50 | 101,46 | 101,26 | 101,18 | 101,15 | 1618 | 1602 | 1523 | 0,31 | 0,31 | 207 | 0,15 |

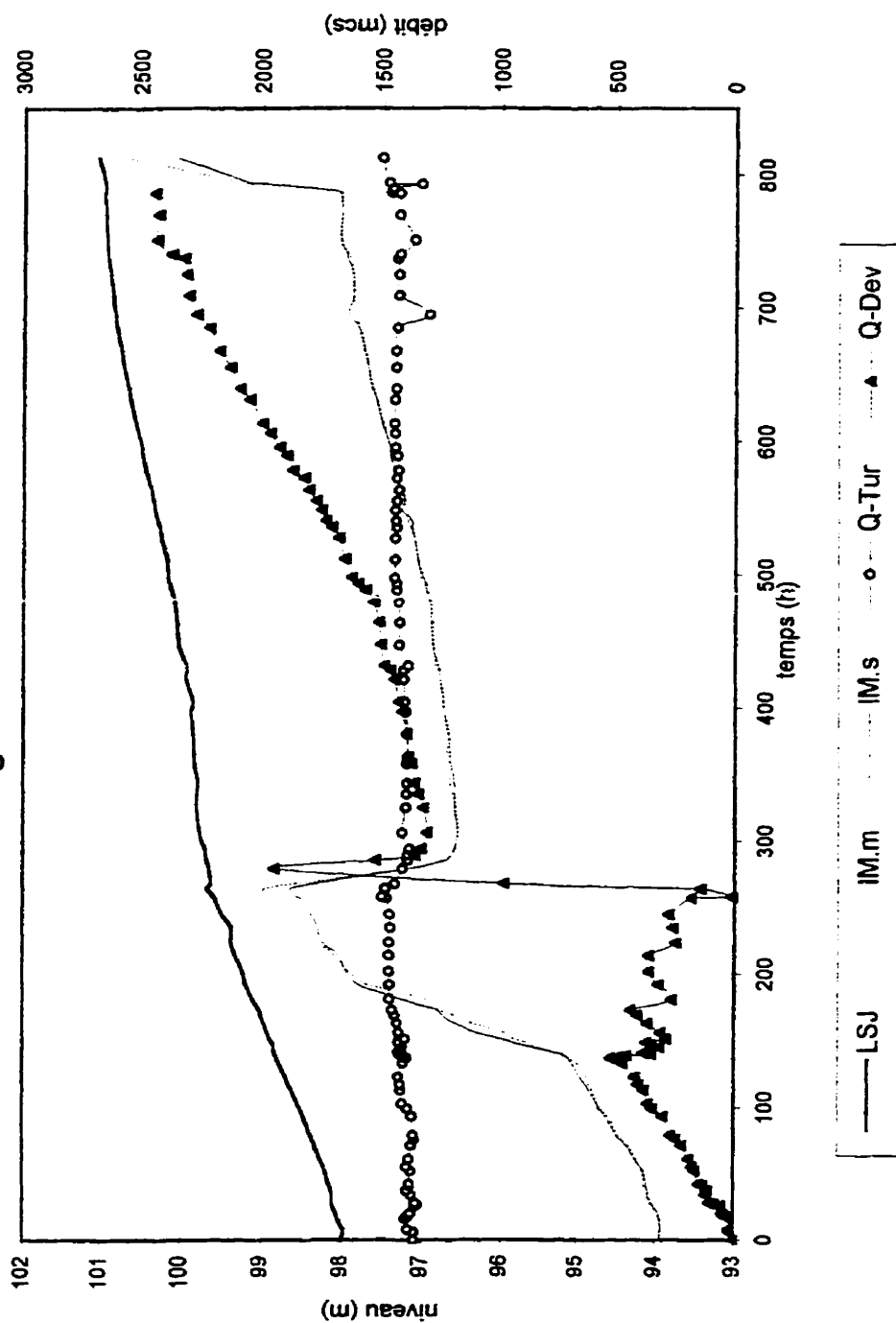
ANNEXE III : Résultats calibrage

Cas 1997

| Temps (h) | Manning | Niveaux mesurés (m) | | | Débit (m³/s) | | Niveaux simulés (m) | | IM Alcan |
|--------------|---------|---------------------|-------|--------|--------------|-------|---------------------|--------|----------|
| | | LSJ | IM.m | Dev4.m | Q-Tur | Q-Dev | IM.s | Dev4.s | |
| 0 | 0,07 | 98 | 93,93 | 94,14 | 1362 | 0 | 93,93 | | 94,6 |
| 6 | 0,07 | 97,97 | 93,92 | 94,16 | 1362 | 18 | 93,94 | 94,19 | 94,13 |
| 8 | 0,066 | 97,98 | 93,92 | 94,16 | 1388 | 18 | 93,93 | 94,19 | 93,88 |
| 16 | 0,066 | 98,05 | 93,94 | 94,18 | 1397 | 19 | 93,93 | 94,19 | 94,38 |
| 17 | 0,066 | 98,05 | 93,94 | 94,19 | 1390 | 28 | 93,94 | 94,19 | 94,36 |
| 18 | 0,066 | 98,06 | 93,95 | 94,19 | 1385 | 38 | 93,94 | 94,2 | 94,36 |
| 20 | 0,066 | 98,07 | 93,95 | 94,21 | 1377 | 48 | 93,95 | 94,21 | 94,4 |
| 26 | 0,066 | 98,11 | 94,03 | 94,28 | 1355 | 54 | 94,02 | 94,27 | 94,83 |
| 27 | 0,066 | 98,11 | 94,03 | 94,29 | 1349 | 81 | 94,04 | 94,28 | 94,61 |
| 28 | 0,066 | 98,12 | 94,07 | 94,3 | 1356 | 102 | 94,04 | 94,29 | 94,36 |
| 34 | 0,064 | 98,12 | 94,09 | 94,32 | 1373 | 117 | 94,09 | 94,34 | 93,96 |
| 37 | 0,064 | 98,13 | 94,09 | 94,33 | 1392 | 112 | 94,09 | 94,34 | 93,86 |
| 41 | 0,064 | 98,15 | 94,14 | 94,35 | 1380 | 130 | 94,11 | 94,35 | 93,96 |
| 42 | 0,064 | 98,16 | 94,14 | 94,36 | 1380 | 146 | 94,11 | 94,35 | 93,84 |
| 52 | 0,064 | 98,21 | 94,16 | 94,42 | 1376 | 164 | 94,15 | 94,4 | 94,15 |
| 55 | 0,062 | 98,22 | 94,19 | 94,44 | 1392 | 177 | 94,19 | 94,43 | 93,89 |
| 61 | 0,062 | 98,27 | 94,24 | 94,5 | 1383 | 192 | 94,25 | 94,49 | 94,37 |
| 71 | 0,062 | 98,34 | 94,34 | 94,62 | 1375 | 222 | 94,36 | 94,6 | 94,97 |
| 76 | 0,062 | 98,37 | 94,41 | 94,69 | 1360 | 248 | 94,45 | 94,68 | 95,01 |
| 79 | 0,062 | 98,39 | 94,47 | 94,73 | 1364 | 268 | 94,49 | 94,72 | 94,9 |
| 93 | 0,062 | 98,48 | 94,6 | 94,88 | 1372 | 300 | 94,64 | 94,87 | 95,04 |
| 99 | 0,062 | 98,52 | 94,73 | 94,93 | 1391 | 346 | 94,7 | 94,93 | 94,71 |
| 103 | 0,062 | 98,55 | 94,74 | 94,96 | 1413 | 365 | 94,74 | 94,96 | 94,53 |
| 113 | 0,062 | 98,62 | 94,81 | 95,05 | 1420 | 382 | 94,85 | 95,08 | 94,85 |
| 117 | 0,062 | 98,66 | 94,85 | 95,09 | 1423 | 407 | 94,89 | 95,13 | 94,89 |
| 123 | 0,062 | 98,7 | 94,88 | 95,17 | 1428 | 420 | 94,96 | 95,19 | 94,95 |
| 133 | 0,062 | 98,78 | 95 | 95,31 | 1409 | 473 | 95,07 | 95,3 | 95,14 |
| 137 | 0,062 | 98,81 | 95,11 | 95,37 | 1395 | 525 | 95,12 | 95,34 | 95,02 |
| 138 | 0,062 | 98,81 | 95,14 | 95,4 | 1404 | 487 | 95,14 | 95,36 | 95,25 |
| 139 | 0,062 | 98,82 | 95,18 | 95,45 | 1408 | 454 | 95,16 | 95,39 | 95,53 |
| 140 | 0,062 | 98,83 | 95,18 | 95,49 | 1425 | 353 | 95,2 | 95,43 | 96,12 |
| 141 | 0,05 | 98,83 | 95,28 | 95,55 | 1426 | 383 | 95,28 | 95,5 | 95,93 |
| 142 | 0,05 | 98,84 | 95,37 | 95,62 | 1426 | 352 | 95,36 | 95,58 | 96,17 |
| 145 | 0,05 | 98,84 | 95,52 | 95,79 | 1415 | 316 | 95,6 | 95,83 | 96,42 |
| 147 | 0,05 | 98,84 | 95,62 | 95,9 | 1416 | 351 | 95,75 | 95,97 | 96,23 |
| 149 | 0,05 | 98,87 | 95,71 | 96,01 | 1429 | 372 | 95,87 | 96,1 | 96,18 |
| 151 | 0,05 | 98,9 | 95,84 | 96,14 | 1401 | 290 | 96,01 | 96,23 | 96,86 |
| 156 | 0,05 | 98,93 | 95,97 | 96,42 | 1429 | 311 | 96,32 | 96,54 | 96,77 |
| 163 | 0,05 | 98,97 | 96,37 | 96,71 | 1435 | 369 | 96,59 | 96,81 | 96,63 |
| 169 | 0,05 | 99,01 | 96,61 | 96,89 | 1444 | 410 | 96,74 | 96,96 | 96,53 |
| 173 | 0,05 | 99,03 | 96,79 | 97,03 | 1456 | 439 | 96,82 | 97,04 | 96,4 |
| 181 | 0,04 | 99,11 | 96,95 | 97,5 | 1467 | 267 | 97,26 | 97,48 | 97,34 |
| 192 | 0,03 | 99,2 | 97,69 | 97,99 | 1469 | 320 | 97,8 | 98,01 | 97,43 |
| 202 | 0,03 | 99,24 | 97,93 | 98,19 | 1470 | 362 | 97,95 | 98,15 | 97,42 |
| 214 | 0,03 | 99,33 | 98,1 | 98,34 | 1470 | 362 | 98,05 | 98,26 | 97,65 |
| 224 | 0,01 | 99,38 | 98,29 | 98,54 | 1470 | 248 | 98,24 | 98,45 | 98,05 |
| 235 | 0,001 | 99,38 | 98,43 | 98,65 | 1465 | 260 | 98,31 | 98,51 | 98,03 |
| 245 | 0,001 | 99,5 | 98,65 | 98,81 | 1468 | 277 | 98,39 | 98,6 | 98,24 |
| 257 | 0,001 | 99,59 | 98,87 | 99,03 | 1482 | 182 | 98,52 | 98,73 | 98,56 |
| 258 | 0,001 | 99,6 | 98,87 | 99,05 | 1501 | 11 | 98,58 | 98,77 | 98,79 |
| 264 | 0,001 | 99,68 | 98,98 | 99,04 | 1487 | 142 | 98,64 | 98,85 | 98,76 |
| 268 | 0,001 | 99,64 | 98,57 | 93,35 | 1448 | 989 | 98,36 | 98,53 | 96,47 |
| 279 | 0,04 | 99,66 | 97,15 | 93,16 | 1413 | 1947 | 97,16 | 97,28 | 87,38 |
| 285 | 0,04 | 99,69 | 96,72 | 93,22 | 1391 | 1528 | 96,7 | 96,85 | 93,61 |
| 289 | 0,04 | 99,7 | 96,63 | 93,28 | 1391 | 1362 | 96,63 | 96,8 | 95,01 |
| 294 | 0,04 | 99,71 | 96,6 | 96,69 | 1383 | 1338 | 96,59 | 96,75 | 95,3 |
| 306 | 0,04 | 99,78 | 96,55 | 96,73 | 1414 | 1313 | 96,56 | 96,73 | 95,78 |
| 325 | 0,04 | 99,81 | 96,57 | 96,76 | 1400 | 1327 | 96,59 | 97,76 | 96 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|--------|-------|------|------|--------|--------|--------|
| 335 | 0,05 | 99,81 | 96,62 | 96,81 | 1397 | 1349 | 96,59 | 96,76 | 95,9 |
| 343 | 0,05 | 99,8 | 96,65 | 96,9 | 1395 | 1365 | 96,6 | 96,76 | 95,74 |
| 358 | 0,054 | 99,84 | 96,66 | 96,92 | 1395 | 1376 | 96,64 | 96,8 | 96 |
| 363 | 0,054 | 99,84 | 96,68 | 96,9 | 1391 | 1390 | 96,65 | 96,81 | 95,944 |
| 380 | 0,054 | 99,86 | 96,69 | 96,93 | 1395 | 1397 | 96,66 | 96,83 | 96,05 |
| 397 | 0,053 | 99,88 | 96,72 | 96,91 | 1399 | 1414 | 96,72 | 96,88 | 96,04 |
| 404 | 0,053 | 99,86 | 96,74 | 97,01 | 1405 | 1431 | 96,72 | 96,88 | 95,82 |
| 421 | 0,053 | 99,95 | 96,77 | 96,99 | 1409 | 1450 | 96,77 | 96,93 | 96,12 |
| 428 | 0,053 | 99,94 | 96,79 | 97,03 | 1408 | 1468 | 96,78 | 96,94 | 95,99 |
| 431 | 0,052 | 99,94 | 96,83 | 97,06 | 1390 | 1492 | 96,8 | 96,96 | 95,96 |
| 447 | 0,052 | 100,04 | 96,85 | 97,09 | 1430 | 1508 | 96,87 | 97,03 | 96,17 |
| 464 | 0,053 | 100,06 | 96,87 | 97,14 | 1426 | 1515 | 96,89 | 97,06 | 96,26 |
| 479 | 0,053 | 100,09 | 96,89 | 97,1 | 1431 | 1536 | 96,91 | 97,07 | 96,29 |
| 488 | 0,053 | 100,12 | 96,95 | 97,17 | 1440 | 1572 | 96,95 | 97,11 | 96,25 |
| 493 | 0,053 | 100,14 | 96,98 | 97,28 | 1441 | 1600 | 96,95 | 97,11 | 96,23 |
| 497 | 0,05 | 100,16 | 97,02 | 97,3 | 1449 | 1629 | 96,99 | 97,15 | 96,17 |
| 511 | 0,049 | 100,18 | 97,06 | 97,33 | 1448 | 1658 | 97,06 | 97,22 | 96,15 |
| 527 | 0,05 | 100,24 | 97,1 | 97,42 | 1447 | 1684 | 97,1 | 97,26 | 96,34 |
| 535 | 0,05 | 100,26 | 97,15 | 97,35 | 1440 | 1711 | 97,13 | 97,28 | 96,35 |
| 540 | 0,05 | 100,29 | 97,18 | 97,41 | 1443 | 1737 | 97,13 | 97,29 | 96,39 |
| 548 | 0,05 | 100,32 | 97,19 | 97,39 | 1447 | 1755 | 97,26 | 97,31 | 96,46 |
| 555 | 0,049 | 100,34 | 97,23 | 97,47 | 1440 | 1778 | 97,22 | 97,37 | 96,5 |
| 563 | 0,049 | 100,37 | 97,27 | 97,5 | 1432 | 1807 | 97,26 | 97,41 | 96,59 |
| 572 | 0,048 | 100,41 | 97,29 | 97,55 | 1441 | 1828 | 97,32 | 97,47 | 96,7 |
| 578 | 0,048 | 100,44 | 97,36 | 97,62 | 1434 | 1873 | 97,35 | 97,49 | 96,74 |
| 589 | 0,047 | 100,48 | 97,39 | 97,75 | 1439 | 1899 | 97,41 | 97,56 | 96,86 |
| 595 | 0,047 | 100,49 | 97,42 | 97,68 | 1447 | 1930 | 97,41 | 97,55 | 96,75 |
| 606 | 0,046 | 100,54 | 97,47 | 97,74 | 1449 | 1967 | 97,47 | 97,61 | 96,8 |
| 613 | 0,045 | 100,57 | 97,51 | 97,75 | 1451 | 2001 | 97,52 | 97,66 | 96,79 |
| 631 | 0,045 | 100,64 | 97,58 | 97,86 | 1449 | 2052 | 97,59 | 97,73 | 96,91 |
| 639 | 0,044 | 100,66 | 97,65 | 97,89 | 1446 | 2095 | 97,63 | 97,77 | 96,84 |
| 655 | 0,044 | 100,72 | 97,69 | 97,95 | 1444 | 2136 | 97,69 | 97,82 | 96,98 |
| 668 | 0,043 | 100,75 | 97,74 | 97,99 | 1446 | 2182 | 97,73 | 97,87 | 96,95 |
| 685 | 0,043 | 100,81 | 97,8 | 98,05 | 1438 | 2222 | 97,8 | 97,93 | 97,1 |
| 695 | 0,043 | 100,83 | 97,85 | 98,13 | 1306 | 2275 | 97,94 | 98,05 | 97,45 |
| 709 | 0,043 | 100,86 | 97,88 | 98,17 | 1434 | 2308 | 97,88 | 98,01 | 97,01 |
| 725 | 0,043 | 100,89 | 97,9 | 98,14 | 1434 | 2319 | 97,88 | 98,01 | 97,1 |
| 737 | 0,041 | 100,93 | 97,92 | 98,19 | 1438 | 2329 | 97,96 | 98,08 | 97,23 |
| 740 | 0,041 | 100,93 | 97,97 | 98,17 | 1430 | 2379 | 97,96 | 98,08 | 97,08 |
| 751 | 0,039 | 100,94 | 98,05 | 98,21 | 1367 | 2435 | 98,04 | 98,15 | 97,15 |
| 770 | 0,039 | 100,96 | 98,03 | 98,25 | 1432 | 2432 | 98,03 | 98,15 | 97,02 |
| 786 | 0,039 | 100,97 | 98,05 | 98,38 | 1432 | 2446 | 98,03 | 98,15 | 97,02 |
| 787 | 0,039 | 100,97 | 98,05 | 98,45 | 1469 | 2225 | 98,05 | 98,19 | 97,64 |
| 790 | 0,026 | 100,96 | 98,42 | 98,72 | 1462 | 1820 | 98,43 | 98,58 | 98,67 |
| 793 | 0,026 | 100,97 | 98,98 | 99,47 | 1340 | 1107 | 98,98 | 99,13 | 99,92 |
| 794 | 0,01 | 100,97 | 99,3 | 99,79 | 1476 | 334 | 99,19 | 99,41 | 100,39 |
| 813 | 0,01 | 101,05 | 100,72 | 100,9 | 1504 | 6 | 100,09 | 100,32 | 100,62 |

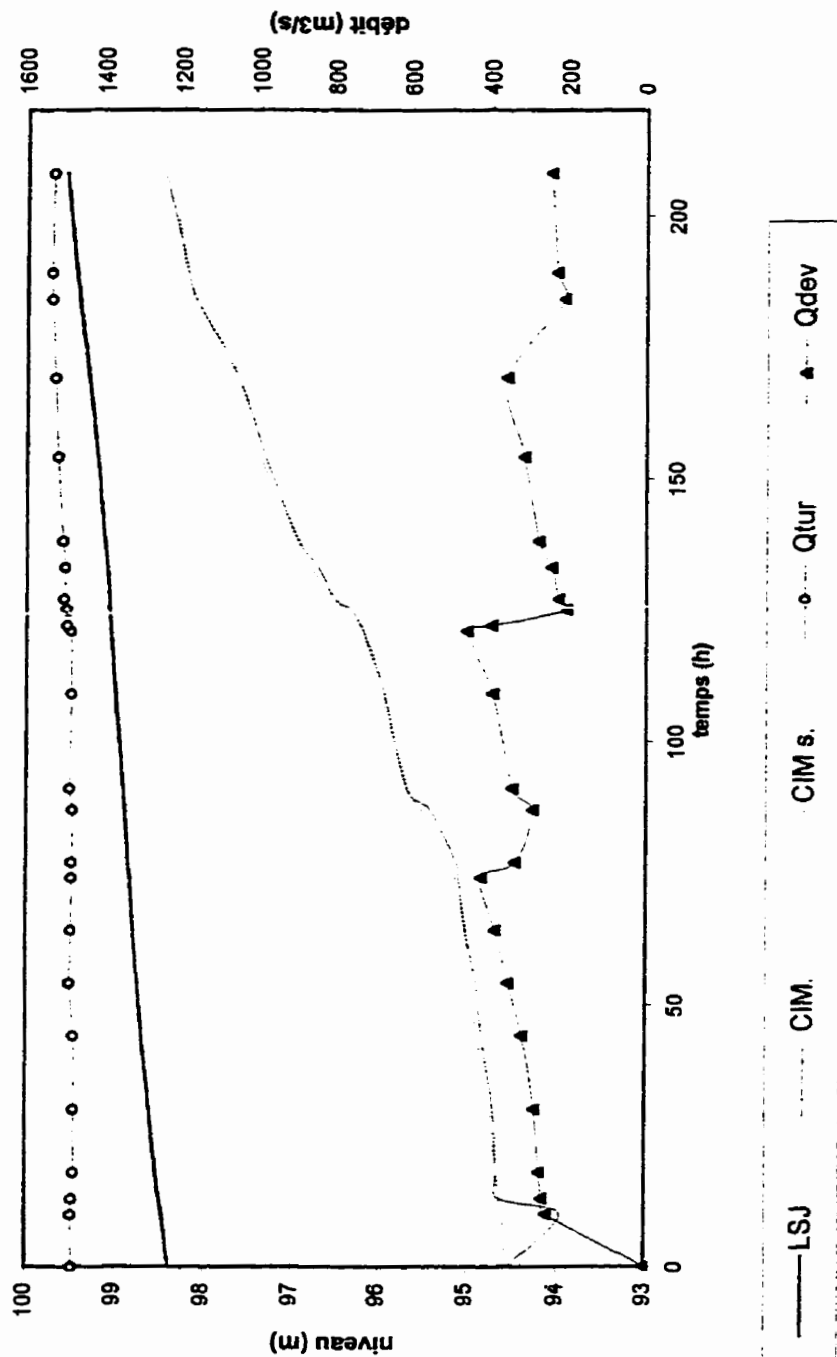
Évolution du profil de la Grande Décharge Calibrage 19970426-19970530



Cas 1996

| Temps (h) | Manning | Niveaux mesurés (m) | | | Débit (m ³ /s) | | Niveaux simulés (m) | |
|--------------|---------|---------------------|-------|--------|---------------------------|------|---------------------|--------|
| | | LSJ | CIM. | Dev4.m | Qtur | Qdev | CIM s. | Dev4.s |
| 0 | 0,08 | 98,4 | 94,55 | 94,787 | 1479 | | 94,55 | |
| 10 | 0,062 | 98,47 | 93,97 | 94,837 | 1480 | 255 | 94,61 | 94,86 |
| 13 | 0,062 | 98,5 | 94,64 | 94,831 | 1478 | 266 | 94,64 | 94,89 |
| 18 | 0,064 | 98,54 | 94,67 | 94,837 | 1474 | 274 | 94,67 | 94,92 |
| 30 | 0,065 | 98,61 | 94,71 | 94,907 | 1474 | 287 | 94,75 | 95 |
| 44 | 0,065 | 98,7 | 94,84 | 95,021 | 1476 | 319 | 94,89 | 95,14 |
| 54 | 0,066 | 98,75 | 94,91 | 95,116 | 1486 | 354 | 94,97 | 95,22 |
| 64 | 0,066 | 98,8 | 95,02 | 95,2 | 1483 | 388 | 95,03 | 95,27 |
| 74 | 0,065 | 98,84 | 95,1 | 95,304 | 1482 | 423 | 95,14 | 95,38 |
| 77 | 0,065 | 98,86 | 95,13 | 95,403 | 1482 | 338 | 95,21 | 95,45 |
| 87 | 0,063 | 98,9 | 95,42 | 95,737 | 1480 | 293 | 95,52 | 95,77 |
| 91 | 0,058 | 98,92 | 95,69 | 95,833 | 1487 | 346 | 95,68 | 95,92 |
| 109 | 0,061 | 99 | 95,94 | 96,11 | 1483 | 395 | 95,97 | 96,21 |
| 121 | 0,058 | 99,05 | 96,18 | 96,327 | 1484 | 460 | 96,19 | 96,42 |
| 122 | 0,058 | 99,05 | 96,21 | 96,38 | 1494 | 398 | 96,22 | 96,45 |
| 125 | 0,058 | 99,07 | 96,33 | 96,56 | 1496 | 207 | 96,38 | 96,62 |
| 127 | 0,052 | 99,07 | 96,51 | 96,668 | 1503 | 228 | 96,51 | 96,74 |
| 133 | 0,052 | 99,1 | 96,7 | 96,947 | 1500 | 246 | 96,79 | 97,02 |
| 138 | 0,052 | 99,13 | 96,93 | 97,135 | 1507 | 280 | 96,95 | 97,18 |
| 154 | 0,042 | 99,21 | 97,32 | 97,53 | 1520 | 318 | 97,38 | 97,61 |
| 169 | 0,038 | 99,31 | 97,63 | 97,825 | 1527 | 362 | 97,63 | 97,85 |
| 184 | 0,02 | 99,41 | 98,11 | 98,293 | 1536 | 214 | 98,11 | 98,34 |
| 189 | 0,01 | 99,44 | 98,2 | 98,527 | 1537 | 234 | 98,23 | 98,45 |
| 208 | 0,01 | 99,56 | 98,46 | 98,77 | 1533 | 250 | 98,38 | 98,59 |

Évolution du profil d'eau de la Grande Décharge Calibrage 19960426-19960505

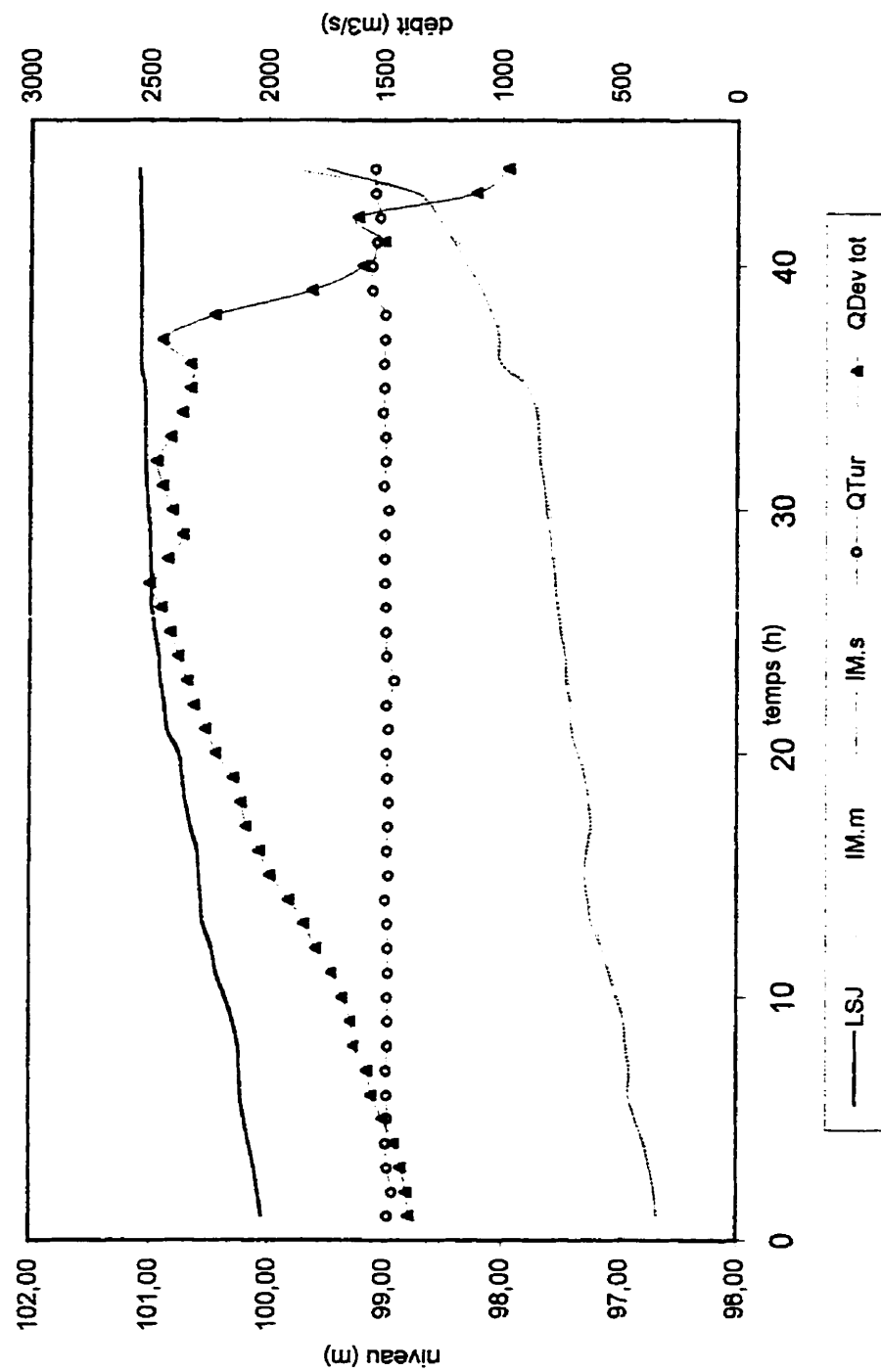


Cas 1995

19950514-19950524

| Temps (h) | Niv. mesurés (m) | | | Débit (m³/s) | | | | | Niveaux simulés (m) | | | |
|--------------|------------------|--------|-------|--------------|--------|--------|--------|----------|---------------------|--------|--------|--------|
| | Manning | LSJ | IM.m | QTur | QDev 4 | QDev 1 | QDev 3 | QDev tot | IM.s | Dev4.s | Dev1.s | Dev3.s |
| 0 | 0,058 | 100,05 | 96,68 | 1482 | 1392 | | | 1392 | 96,69 | 96,88 | | |
| 19 | 0,060 | 100,08 | 96,71 | 1462 | 1400 | | | 1400 | 96,70 | 96,87 | | |
| 25 | 0,057 | 100,11 | 96,74 | 1483 | 1424 | | | 1424 | 96,75 | 96,93 | | |
| 34 | 0,057 | 100,16 | 96,79 | 1490 | 1454 | | | 1454 | 96,80 | 96,98 | | |
| 43 | 0,056 | 100,20 | 96,87 | 1480 | 1503 | | | 1503 | 96,88 | 97,06 | | |
| 50 | 0,055 | 100,23 | 96,93 | 1484 | 1552 | | | 1552 | 96,93 | 97,10 | | |
| 51 | 0,055 | 100,24 | 96,93 | 1488 | 1566 | 6 | | 1572 | 96,92 | 97,10 | 96,93 | 97,18 |
| 54 | 0,052 | 100,25 | 96,96 | 1481 | 1587 | 42 | | 1629 | 96,95 | 97,13 | 96,95 | 97,21 |
| 63 | 0,054 | 100,30 | 96,97 | 1481 | 1591 | 52 | | 1643 | 96,97 | 97,16 | 96,97 | 97,23 |
| 75 | 0,054 | 100,36 | 97,02 | 1483 | 1624 | 57 | | 1681 | 97,04 | 97,22 | 97,04 | 97,31 |
| 85 | 0,053 | 100,44 | 97,09 | 1480 | 1662 | 65 | | 1727 | 97,10 | 97,29 | 97,10 | 97,37 |
| 91 | 0,051 | 100,48 | 97,16 | 1480 | 1716 | 79 | | 1795 | 97,16 | 97,35 | 97,16 | 97,44 |
| 99 | 0,051 | 100,55 | 97,20 | 1482 | 1759 | 88 | | 1847 | 97,25 | 97,44 | 97,25 | 97,53 |
| 102 | 0,050 | 100,57 | 97,27 | 1492 | 1810 | 100 | | 1910 | 97,28 | 97,47 | 97,28 | 97,56 |
| 105 | 0,049 | 100,59 | 97,30 | 1478 | 1839 | 107 | 46 | 1992 | 97,30 | 97,49 | 97,30 | 97,58 |
| 107 | 0,050 | 100,60 | 97,28 | 1484 | 1828 | 104 | 103 | 2035 | 97,29 | 97,47 | 97,29 | 97,56 |
| 115 | 0,050 | 100,66 | 97,25 | 1481 | 1805 | 99 | 189 | 2093 | 97,28 | 97,44 | 97,26 | 97,52 |
| 123 | 0,050 | 100,70 | 97,27 | 1477 | 1814 | 101 | 201 | 2116 | 97,27 | 97,45 | 97,27 | 97,53 |
| 129 | 0,049 | 100,73 | 97,30 | 1482 | 1832 | 105 | 209 | 2146 | 97,30 | 97,48 | 97,30 | 97,56 |
| 134 | 0,048 | 100,76 | 97,33 | 1486 | 1876 | 116 | 230 | 2222 | 97,36 | 97,54 | 97,36 | 97,62 |
| 149 | 0,048 | 100,86 | 97,41 | 1478 | 1902 | 122 | 242 | 2266 | 97,42 | 97,60 | 97,42 | 97,69 |
| 154 | 0,048 | 100,88 | 97,42 | 1488 | 1932 | 128 | 255 | 2315 | 97,42 | 97,60 | 97,42 | 97,69 |
| 164 | 0,048 | 100,92 | 97,45 | 1451 | 1948 | 132 | 263 | 2343 | 97,47 | 97,65 | 97,47 | 97,74 |
| 169 | 0,048 | 100,93 | 97,47 | 1486 | 1971 | 137 | 273 | 2381 | 97,47 | 97,65 | 97,47 | 97,74 |
| 178 | 0,046 | 100,96 | 97,50 | 1489 | 1991 | 142 | 282 | 2415 | 97,51 | 97,69 | 97,51 | 97,78 |
| 188 | 0,044 | 100,99 | 97,53 | 1489 | 2013 | 147 | 292 | 2452 | 97,54 | 97,72 | 97,54 | 97,81 |
| 189 | 0,044 | 100,99 | 97,56 | 1493 | 2042 | 154 | 306 | 2502 | 97,55 | 97,73 | 97,55 | 97,82 |
| 191 | 0,046 | 101,00 | 97,56 | 1493 | 2042 | 103 | 280 | 2425 | 97,58 | 97,75 | 97,58 | 97,84 |
| 193 | 0,048 | 101,00 | 97,56 | 1493 | 2042 | 51 | 268 | 2381 | 97,60 | 97,75 | 97,60 | 97,84 |
| 197 | 0,048 | 101,02 | 97,61 | 1478 | 2082 | 325 | | 2407 | 97,63 | 97,75 | 97,63 | 97,84 |
| 208 | 0,046 | 101,03 | 97,65 | 1498 | 2110 | 339 | | 2449 | 97,65 | 97,78 | 97,65 | 97,87 |
| 215 | 0,045 | 101,04 | 97,68 | 1492 | 2131 | 344 | | 2475 | 97,69 | 97,82 | 97,69 | 97,91 |
| 216 | 0,045 | 101,04 | 97,69 | 1492 | 2147 | 267 | | 2414 | 97,70 | 97,83 | 97,70 | 97,93 |
| 217 | 0,045 | 101,04 | 97,70 | 1504 | 2155 | 210 | | 2365 | 97,72 | 97,85 | 97,72 | 97,95 |
| 220 | 0,045 | 101,05 | 97,76 | 1497 | 2193 | 136 | | 2329 | 97,79 | 97,92 | 97,79 | 98,03 |
| 233 | 0,042 | 101,08 | 98,01 | 1498 | 2330 | | | 2330 | 98,02 | 98,15 | 98,02 | 98,76 |
| 234 | 0,040 | 101,08 | 98,05 | 1493 | 2447 | | | 2447 | 98,03 | 98,16 | 98,03 | 98,27 |
| 235 | 0,038 | 101,08 | 98,05 | 1493 | 2225 | | | 2225 | 98,09 | 98,22 | 98,09 | 98,33 |
| 236 | 0,038 | 101,08 | 98,11 | 1553 | 1818 | | | 1818 | 98,18 | 98,34 | 98,18 | 98,43 |
| 237 | 0,038 | 101,08 | 98,11 | 1553 | 1590 | | | 1590 | 98,30 | 98,47 | 98,30 | 98,55 |
| 238 | 0,038 | 101,08 | 98,39 | 1531 | 1499 | | | 1499 | 98,42 | 98,59 | 98,43 | 98,67 |
| 239 | 0,030 | 101,09 | 98,62 | 1518 | 1614 | | | 1614 | 98,55 | 98,71 | 98,55 | 98,79 |
| 240 | 0,030 | 101,09 | 98,72 | 1539 | 1110 | | | 1110 | 98,73 | 98,92 | 98,74 | 98,98 |
| 247 | 0,010 | 101,10 | 99,83 | 1542 | 977 | | | 977 | 99,52 | 99,71 | 99,52 | 99,77 |

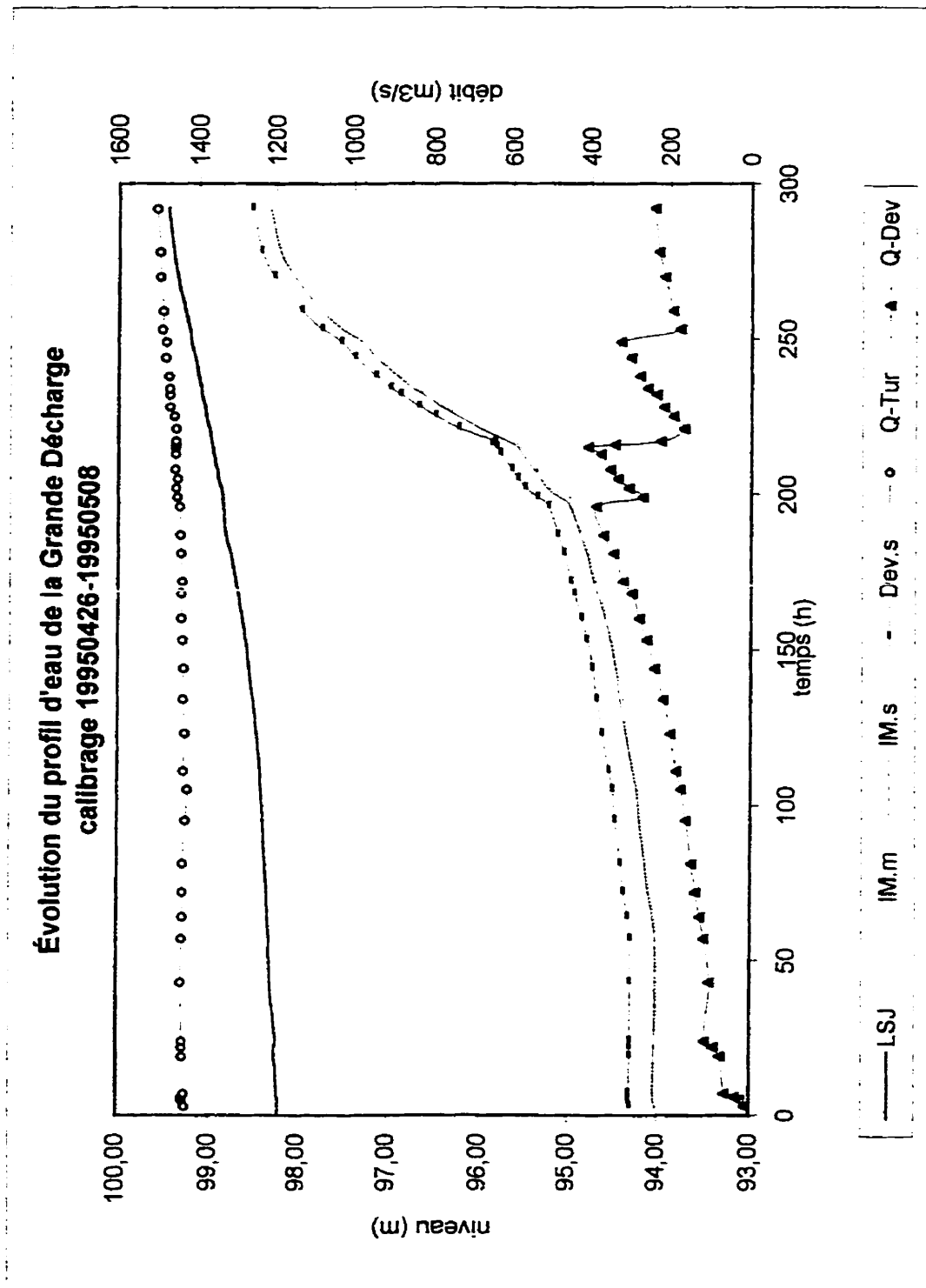
**Évolution du profil d'eau de la Grande Décharge
calibrage 19950514-19950524**



Cas 1995

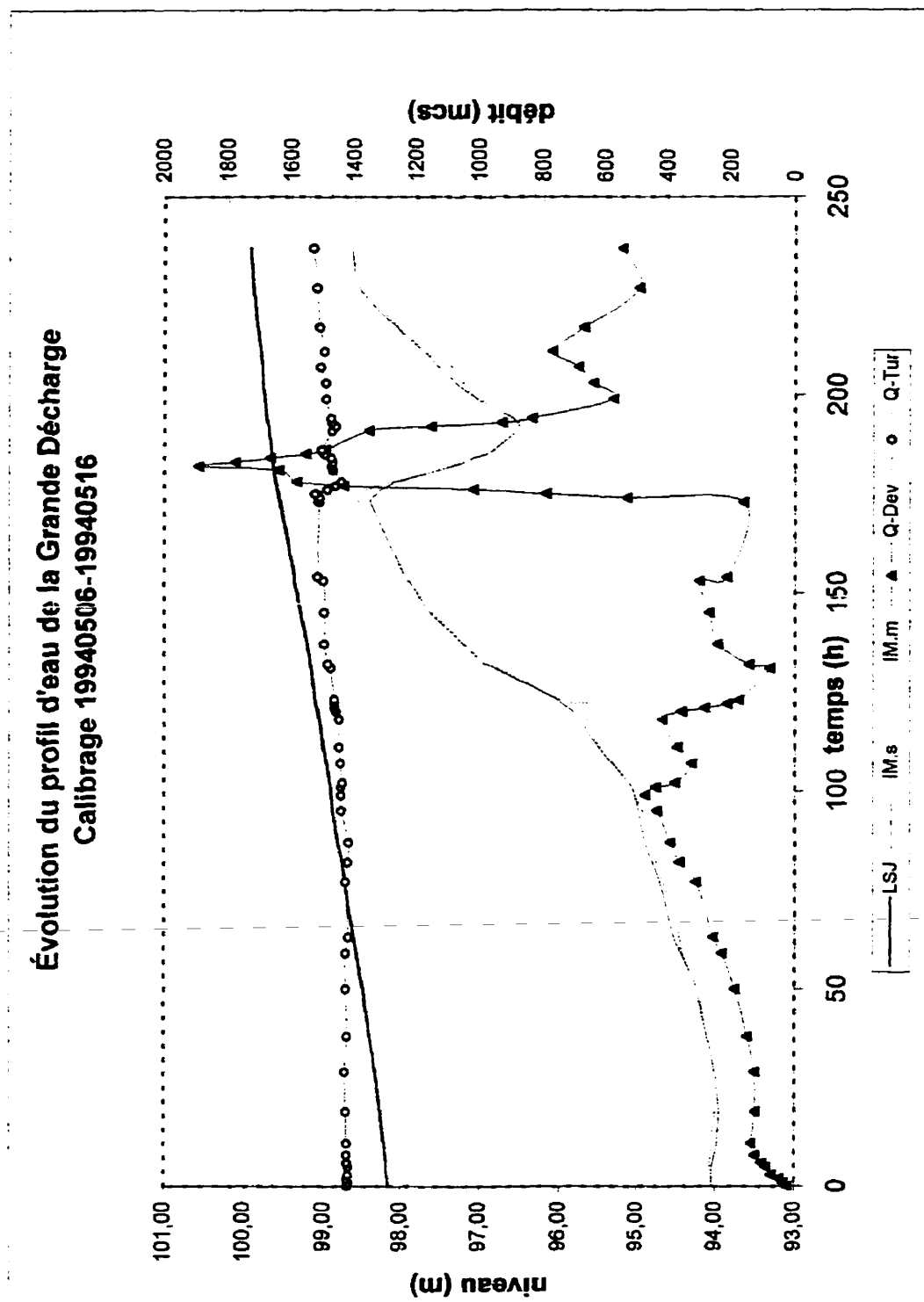
19950426-19950508

| Temps (h) | Manning | Niveaux mesurés (m) | | Débit (m³/s) | | Niveaux simulés (m) | |
|--------------|---------|---------------------|-------|--------------|-------|---------------------|-------|
| | | LSJ | IM.m | Q-Tur | Q-Dev | IM.s | Dev.s |
| 0 | 0,076 | 98,21 | 93,99 | | | | |
| 3 | 0,076 | 98,21 | 94,02 | 1431 | 11 | 94,03 | 94,30 |
| 5 | 0,070 | 98,21 | 94,05 | 1437 | 24 | 94,04 | 94,31 |
| 6 | 0,070 | 98,22 | 94,05 | 1437 | 36 | 94,04 | 94,31 |
| 7 | 0,070 | 98,22 | 94,05 | 1432 | 61 | 94,04 | 94,31 |
| 19 | 0,070 | 98,25 | 94,04 | 1438 | 73 | 94,04 | 94,30 |
| 22 | 0,070 | 98,25 | 94,03 | 1438 | 89 | 94,04 | 94,30 |
| 24 | 0,070 | 98,24 | 94,03 | 1438 | 110 | 94,03 | 94,30 |
| 43 | 0,070 | 98,31 | 94,01 | 1441 | 99 | 94,03 | 94,30 |
| 57 | 0,070 | 98,32 | 94,03 | 1439 | 112 | 94,03 | 94,30 |
| 64 | 0,069 | 98,34 | 94,04 | 1438 | 123 | 94,06 | 94,33 |
| 72 | 0,069 | 98,35 | 94,10 | 1438 | 134 | 94,11 | 94,38 |
| 81 | 0,069 | 98,37 | 94,14 | 1437 | 144 | 94,15 | 94,41 |
| 95 | 0,069 | 98,40 | 94,20 | 1431 | 158 | 94,21 | 94,47 |
| 105 | 0,070 | 98,42 | 94,23 | 1426 | 170 | 94,24 | 94,50 |
| 111 | 0,069 | 98,43 | 94,27 | 1436 | 182 | 94,28 | 94,54 |
| 123 | 0,069 | 98,47 | 94,35 | 1433 | 197 | 94,36 | 94,62 |
| 134 | 0,069 | 98,51 | 94,39 | 1438 | 215 | 94,42 | 94,68 |
| 144 | 0,070 | 98,56 | 94,46 | 1436 | 237 | 94,47 | 94,73 |
| 153 | 0,070 | 98,60 | 94,52 | 1439 | 257 | 94,53 | 94,79 |
| 160 | 0,070 | 98,64 | 94,59 | 1442 | 276 | 94,59 | 94,85 |
| 168 | 0,070 | 98,69 | 94,64 | 1443 | 295 | 94,68 | 94,93 |
| 172 | 0,070 | 98,71 | 94,70 | 1440 | 318 | 94,72 | 94,97 |
| 181 | 0,070 | 98,77 | 94,79 | 1444 | 341 | 94,80 | 95,05 |
| 187 | 0,070 | 98,83 | 94,85 | 1445 | 367 | 94,87 | 95,12 |
| 196 | 0,068 | 98,85 | 94,99 | 1448 | 386 | 94,98 | 95,22 |
| 199 | 0,066 | 98,86 | 94,99 | 1454 | 269 | 95,11 | 95,35 |
| 202 | 0,062 | 98,88 | 95,23 | 1456 | 304 | 95,24 | 95,49 |
| 205 | 0,066 | 98,91 | 95,31 | 1453 | 331 | 95,33 | 95,57 |
| 208 | 0,066 | 98,92 | 95,37 | 1459 | 350 | 95,40 | 95,64 |
| 213 | 0,064 | 98,96 | 95,45 | 1458 | 374 | 95,53 | 95,77 |
| 215 | 0,064 | 98,97 | 95,57 | 1458 | 407 | 95,58 | 95,81 |
| 216 | 0,062 | 98,98 | 95,57 | 1458 | 339 | 95,63 | 95,86 |
| 217 | 0,060 | 98,99 | 95,70 | 1458 | 222 | 95,70 | 95,83 |
| 221 | 0,058 | 99,01 | 95,99 | 1456 | 165 | 96,00 | 96,24 |
| 225 | 0,058 | 99,05 | 96,18 | 1461 | 191 | 96,26 | 96,49 |
| 228 | 0,056 | 99,06 | 96,43 | 1472 | 215 | 96,44 | 96,67 |
| 232 | 0,056 | 99,09 | 96,56 | 1472 | 234 | 96,63 | 96,86 |
| 234 | 0,052 | 99,10 | 96,74 | 1474 | 256 | 96,74 | 96,97 |
| 238 | 0,052 | 99,13 | 96,89 | 1475 | 276 | 96,91 | 97,13 |
| 244 | 0,048 | 99,17 | 97,14 | 1484 | 299 | 97,14 | 97,36 |
| 249 | 0,046 | 99,21 | 97,29 | 1482 | 324 | 97,29 | 97,51 |
| 253 | 0,041 | 99,23 | 97,50 | 1492 | 175 | 97,51 | 97,73 |
| 259 | 0,037 | 99,28 | 97,74 | 1490 | 192 | 97,74 | 97,96 |
| 270 | 0,024 | 99,36 | 98,05 | 1498 | 214 | 98,05 | 98,27 |
| 278 | 0,016 | 99,41 | 98,20 | 1499 | 229 | 98,21 | 98,42 |
| 292 | 0,010 | 99,47 | 98,33 | 1506 | 240 | 98,32 | 98,53 |

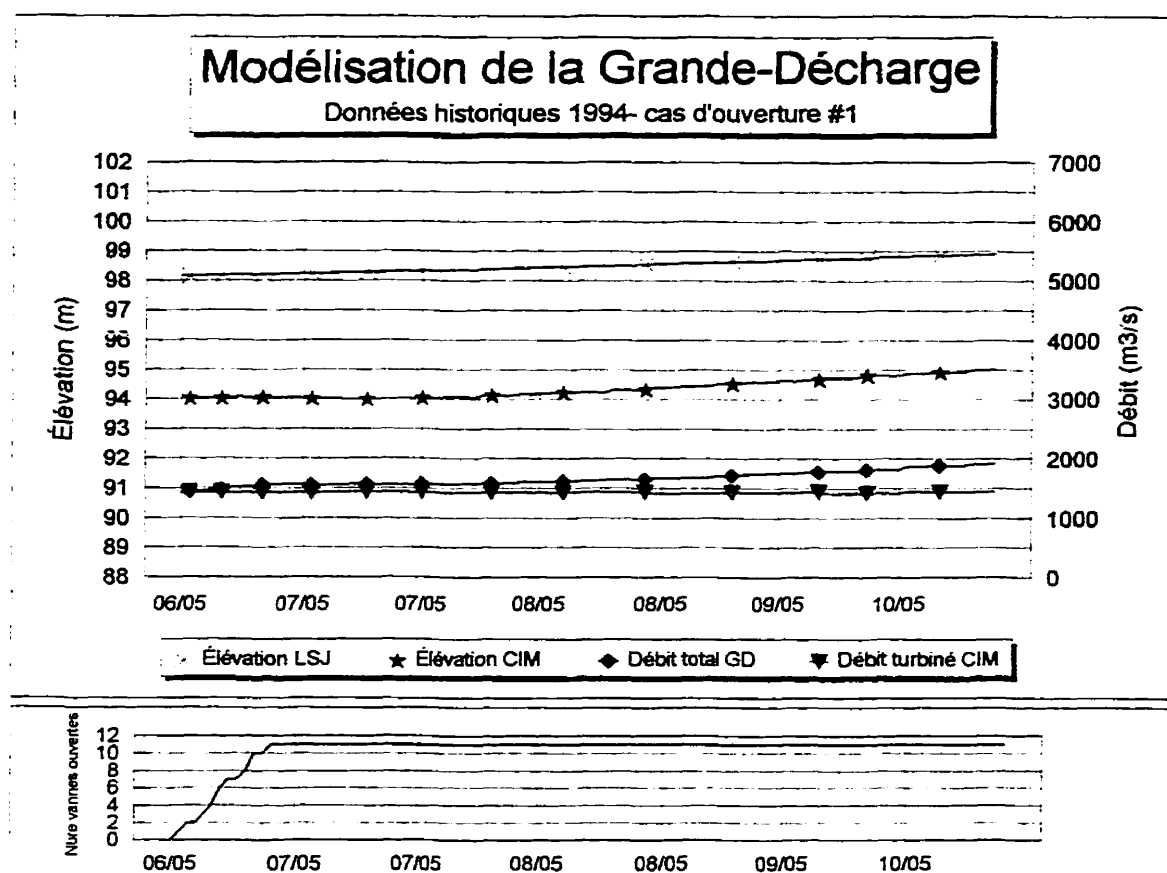


Cas 1994

| Temps (h) | Manning | Niveaux mesurés (m) | | Débit (m³/s) | | Niveaux simulés (m) | |
|--------------|---------|---------------------|-------|--------------|-------|---------------------|--------|
| | | LSJ | IM.m | Q-Tur | Q-Dev | IM.s | dev4.s |
| 0 | 0.070 | 98,16 | 94,04 | 1425 | 24 | 94,05 | 94,32 |
| 1 | 0.070 | 98,17 | 94,05 | 1420 | 36 | 94,05 | 94,32 |
| 2 | 0.070 | 98,17 | 94,04 | 1424 | 48 | 94,05 | 94,32 |
| 3 | 0.070 | 98,18 | 94,05 | 1421 | 73 | 94,05 | 94,32 |
| 5 | 0.070 | 98,19 | 94,07 | 1420 | 90 | 94,04 | 94,31 |
| 6 | 0.070 | 98,19 | 94,07 | 1424 | 102 | 94,03 | 94,3 |
| 8 | 0.070 | 98,20 | 94,06 | 1426 | 124 | 94,01 | 94,27 |
| 11 | 0.070 | 98,22 | 94,06 | 1426 | 137 | 93,98 | 94,24 |
| 19 | 0.070 | 98,27 | 94,01 | 1430 | 125 | 93,96 | 94,22 |
| 29 | 0.068 | 98,33 | 94,04 | 1433 | 126 | 94,01 | 94,28 |
| 38 | 0.068 | 98,41 | 94,14 | 1425 | 150 | 94,11 | 94,37 |
| 50 | 0.068 | 98,50 | 94,24 | 1430 | 190 | 94,24 | 94,5 |
| 59 | 0.066 | 98,58 | 94,42 | 1430 | 230 | 94,43 | 94,69 |
| 63 | 0.066 | 98,61 | 94,45 | 1420 | 258 | 94,52 | 94,77 |
| 77 | 0.067 | 98,73 | 94,67 | 1430 | 313 | 94,705 | 94,95 |
| 82 | 0.067 | 98,76 | 94,75 | 1421 | 363 | 94,8 | 95,04 |
| 87 | 0.067 | 98,82 | 94,81 | 1418 | 392 | 94,89 | 95,13 |
| 95 | 0.067 | 98,89 | 94,92 | 1444 | 434 | 94,97 | 95,22 |
| 99 | 0.067 | 98,91 | 95,02 | 1445 | 472 | 95,02 | 95,25 |
| 101 | 0.067 | 98,92 | 95,02 | 1445 | 438 | 95,06 | 95,3 |
| 102 | 0.067 | 98,93 | 95,10 | 1440 | 376 | 95,1 | 95,33 |
| 107 | 0.064 | 98,97 | 95,31 | 1447 | 325 | 95,32 | 95,56 |
| 111 | 0.062 | 99,01 | 95,49 | 1452 | 368 | 95,5 | 95,73 |
| 118 | 0.062 | 99,06 | 95,64 | 1451 | 417 | 95,74 | 95,97 |
| 120 | 0.062 | 99,07 | 95,64 | 1460 | 356 | 95,83 | 96,07 |
| 121 | 0.062 | 99,09 | 95,64 | 1465 | 284 | 95,89 | 96,13 |
| 122 | 0.062 | 99,1 | 95,64 | 1465 | 213 | 95,96 | 96,2 |
| 123 | 0.062 | 99,11 | 96,00 | 1467 | 178 | 96,03 | 96,27 |
| 131 | 0.05 | 99,16 | 96,77 | 1479 | 80 | 96,81 | 97,06 |
| 132 | 0.048 | 99,17 | 96,95 | 1488 | 144 | 96,92 | 97,14 |
| 137 | 0.044 | 99,21 | 97,20 | 1499 | 244 | 97,21 | 97,44 |
| 145 | 0.035 | 99,29 | 97,60 | 1500 | 271 | 97,63 | 97,86 |
| 153 | 0.03 | 99,37 | 97,91 | 1502 | 301 | 97,9 | 98,12 |
| 154 | 0.03 | 99,37 | 97,94 | 1519 | 214 | 97,94 | 98,16 |
| 173 | 0.001 | 99,55 | 98,56 | 1517 | 162 | 98,4 | 98,63 |
| 174 | 0.001 | 99,56 | 98,56 | 1515 | 528 | 98,38 | 98,58 |
| 175 | 0.001 | 99,57 | 98,56 | 1527 | 792 | 98,32 | 98,51 |
| 176 | 0.001 | 99,58 | 98,45 | 1490 | 1019 | 98,26 | 98,44 |
| 177 | 0.001 | 99,59 | 98,26 | 1463 | 1435 | 98,16 | 98,31 |
| 178 | 0.001 | 99,60 | 98,10 | 1444 | 1585 | 98,06 | 98,21 |
| 181 | 0.055 | 99,62 | 97,52 | 1471 | 1643 | 97,53 | 97,68 |
| 182 | 0.05 | 99,63 | 97,37 | 1476 | 1892 | 97,35 | 97,49 |
| 183 | 0.05 | 99,64 | 97,22 | 1473 | 1777 | 97,21 | 97,36 |
| 184 | 0.055 | 99,64 | 97,07 | 1477 | 1666 | 97,08 | 97,24 |
| 185 | 0.065 | 99,65 | 96,92 | 1498 | 1557 | 96,94 | 97,11 |
| 186 | 0.065 | 99,65 | 96,83 | 1507 | 1494 | 96,82 | 97 |
| 191 | 0.062 | 99,69 | 96,53 | 1474 | 1353 | 96,53 | 96,71 |
| 192 | 0.062 | 99,69 | 96,50 | 1462 | 1154 | 96,5 | 96,69 |
| 193 | 0.062 | 99,70 | 96,51 | 1474 | 928 | 96,52 | 96,72 |
| 194 | 0.055 | 99,71 | 96,57 | 1477 | 837 | 96,58 | 96,78 |
| 199 | 0.05 | 99,74 | 97,03 | 1494 | 575 | 97,04 | 97,27 |
| 203 | 0.05 | 99,76 | 97,21 | 1495 | 639 | 97,31 | 97,52 |
| 207 | 0.045 | 99,77 | 97,37 | 1511 | 688 | 97,53 | 97,74 |
| 211 | 0.04 | 99,79 | 97,71 | 1500 | 772 | 97,71 | 97,91 |
| 217 | 0.03 | 99,83 | 98,04 | 1515 | 670 | 98,06 | 98,26 |
| 227 | 0.01 | 99,88 | 98,44 | 1523 | 490 | 98,54 | 98,75 |
| 237 | 0.001 | 99,92 | 98,57 | 1533 | 545 | 98,64 | 98,84 |

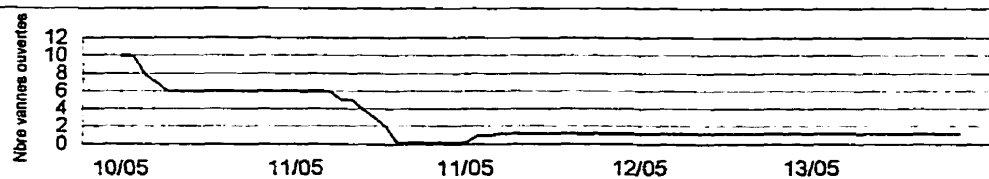
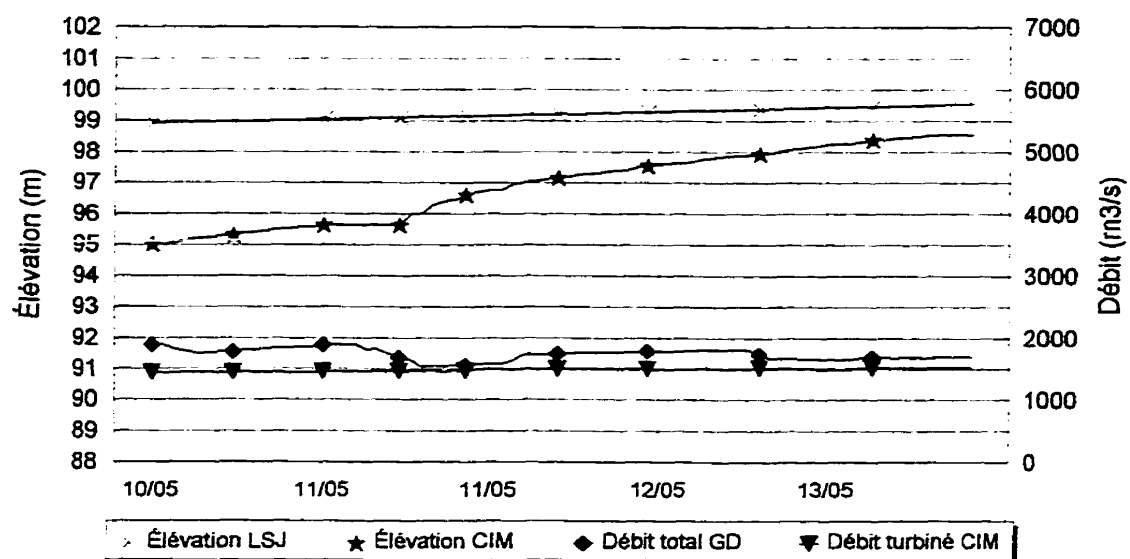


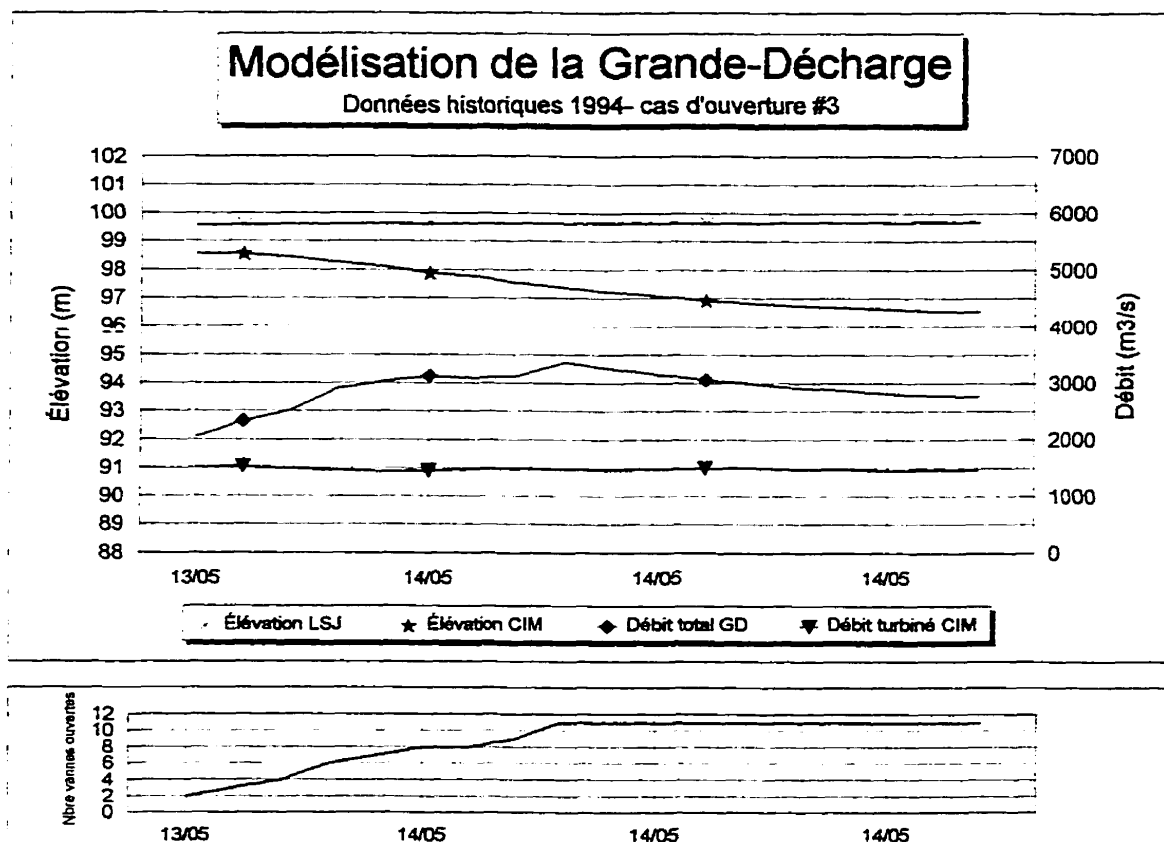
ANNEXE IV : Cas d'ouverture et de fermeture



Modélisation de la Grande-Décharge

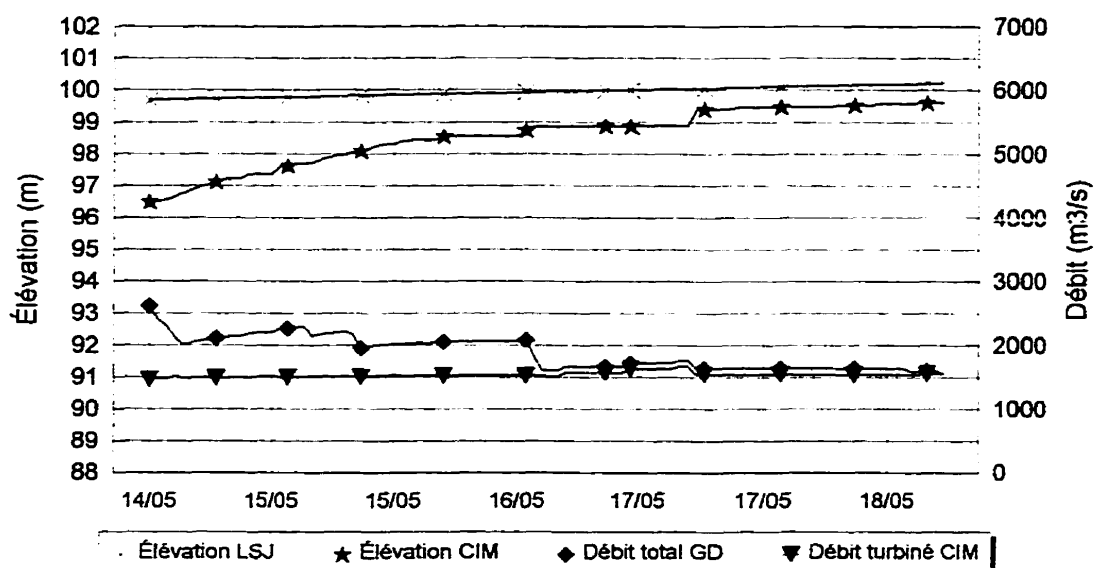
Données historiques 1994- cas de fermeture #2

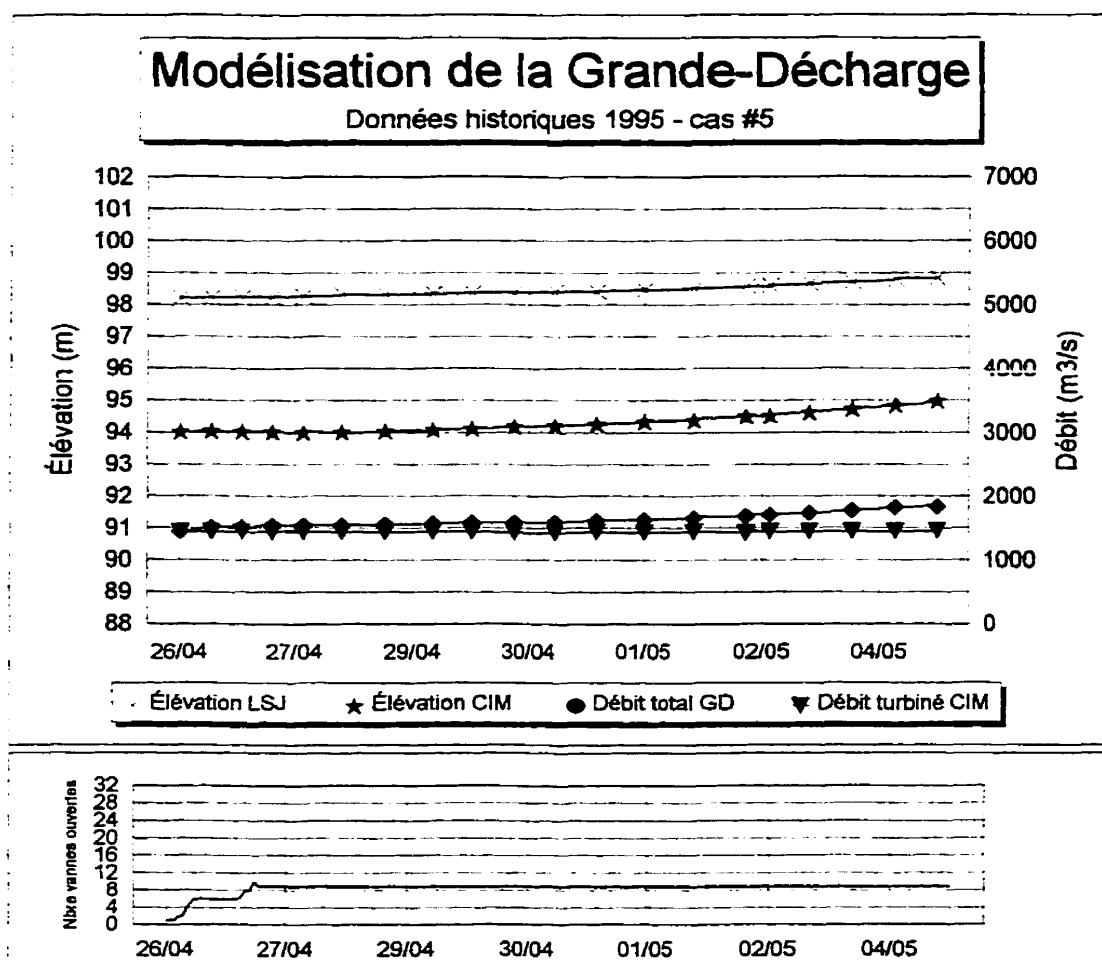


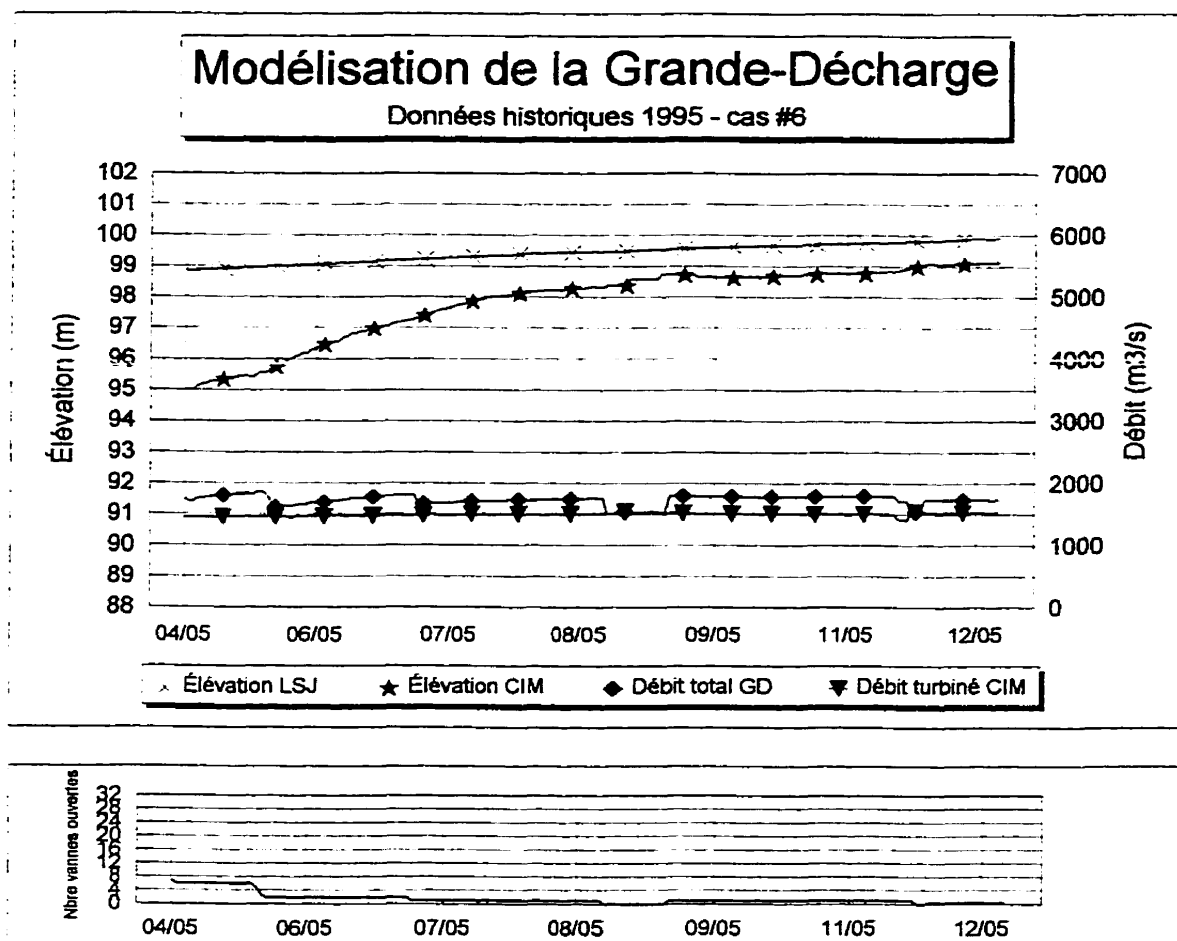


Modélisation de la Grande-Décharge

Données historiques 1994 - cas de fermeture #4

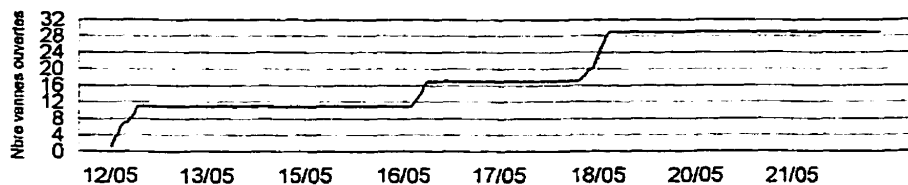
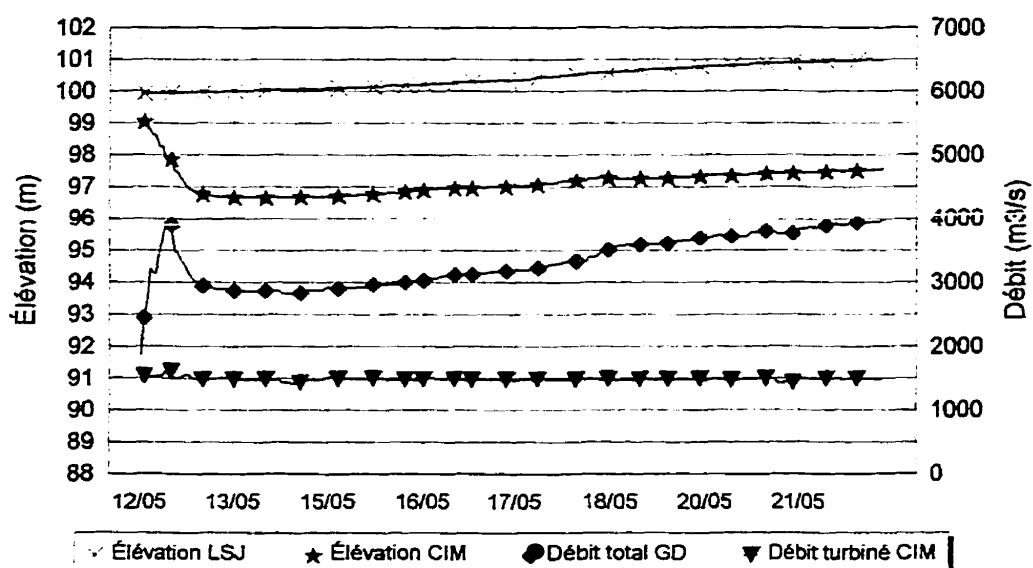






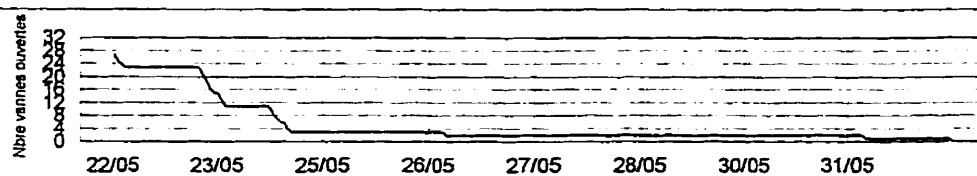
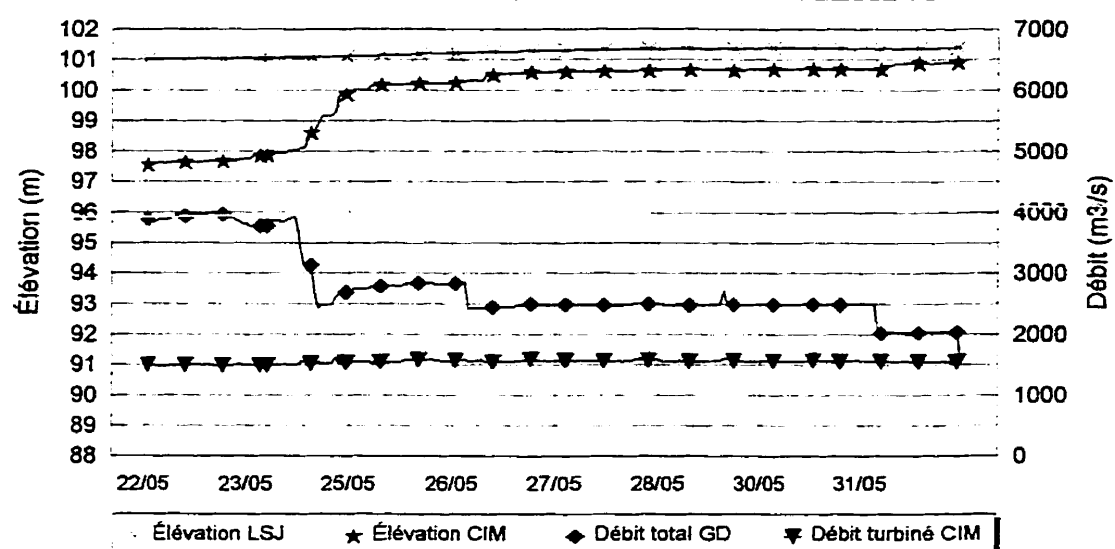
Modélisation de la Grande-Décharge

Données historiques 1995 - cas#7



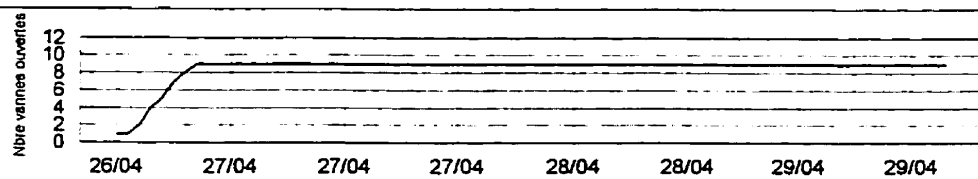
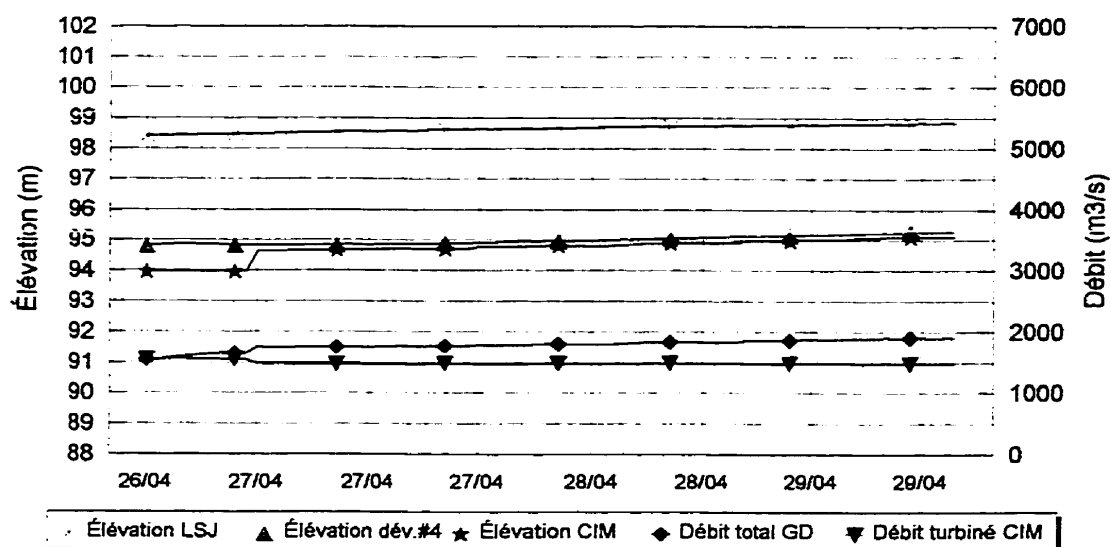
Modélisation de la Grande-Décharge

Données historiques 1995 - cas #8



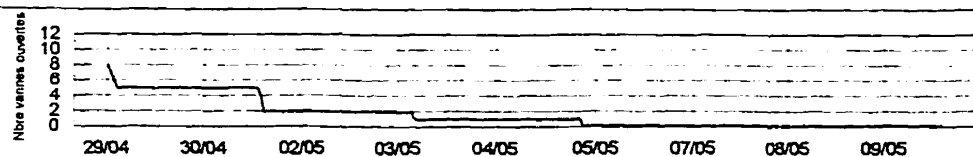
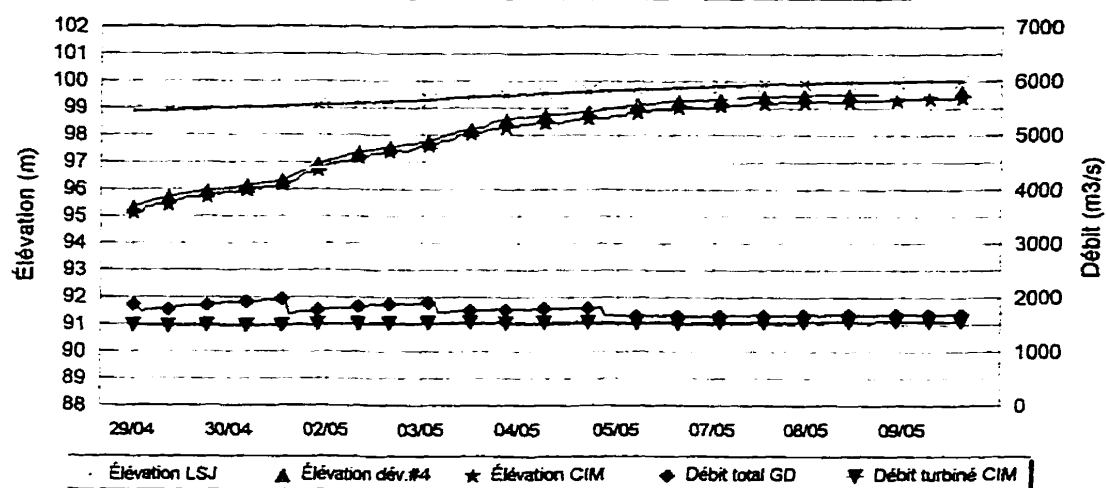
Modélisation de la Grande-Décharge

Données historiques 1996 - cas #9



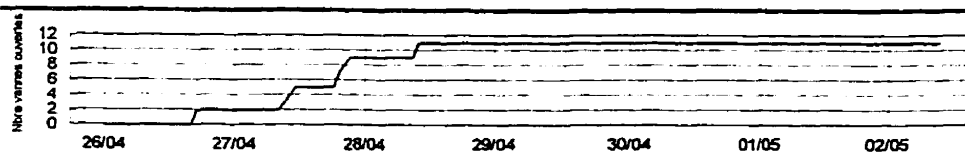
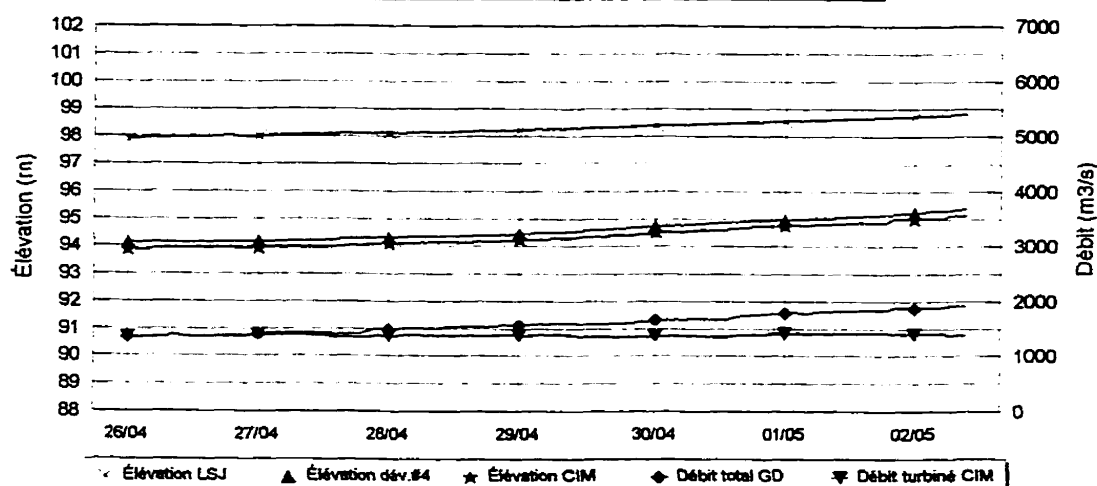
Modélisation de la Grande-Décharge

Données historiques 1996 - cas #10



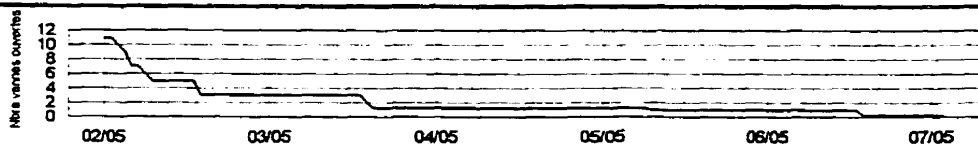
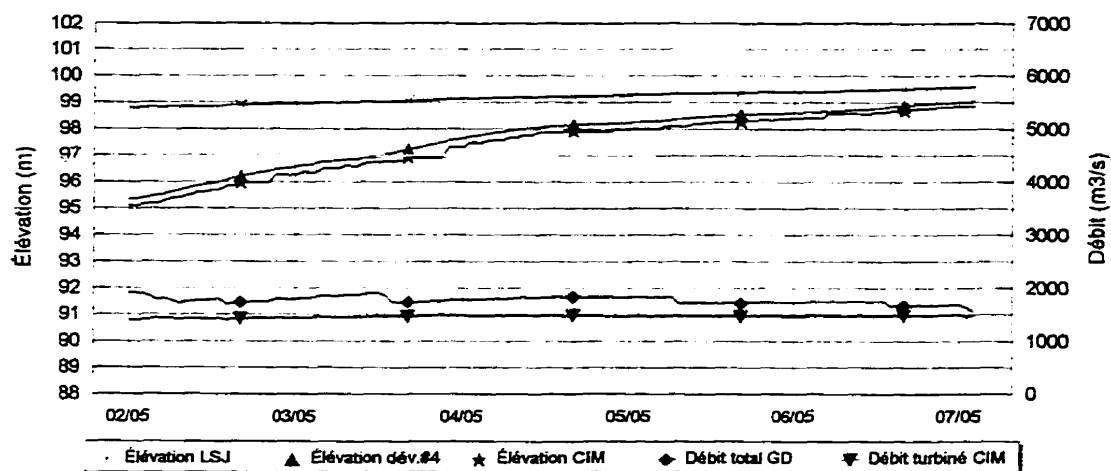
Modélisation de la Grande-Décharge

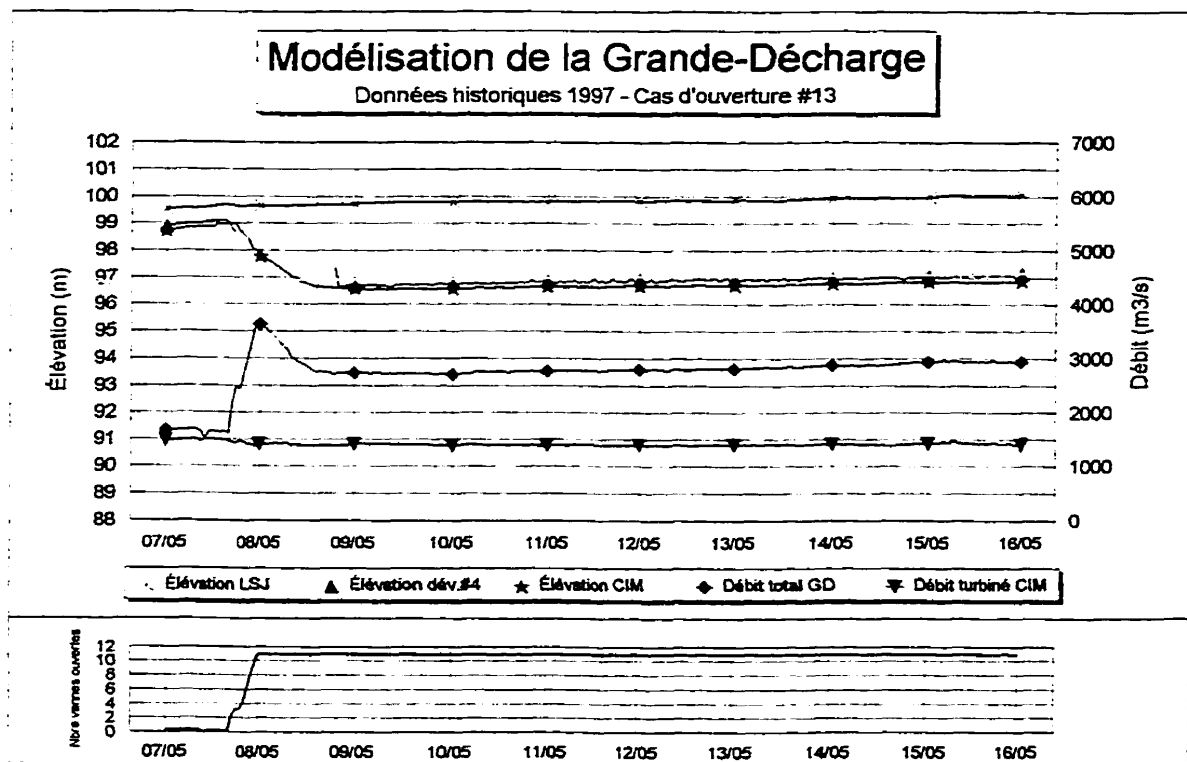
Données historiques 1997 - Cas d'ouverture #11



Modélisation de la Grande-Décharge

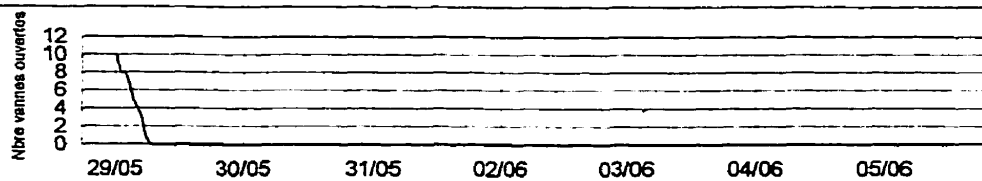
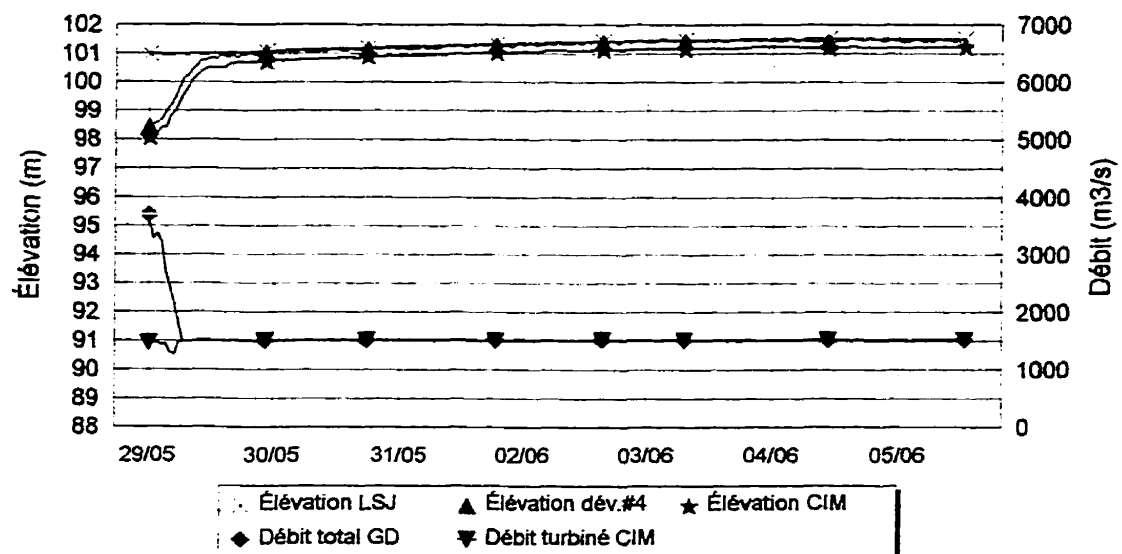
Données historiques 1997 - Cas de fermeture #12





Modélisation de la Grande-Décharge

Données historiques 1997 - Cas de fermeture #14



ANNEXE V : Cas validés

Cas de fermeture

cas #6

| Date | temps | nb Van | LSJ | IMmes | IMsim | diff niv | Qtur mes | Qdev mes | Qdev sim | Qdev sim | Qtotmes | Qtotsim | Qtotsim | diff Q | diff Qcalc | %erreur | %erreur |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|------------|---------|---------|
| | h | | m | m | m | m | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | | |
| 19950504 | 0 | 10 | 98.84 | 94.88 | 94.88 | 0 | 1441 | 383 | 334 | 383 | 1824 | 1825 | 1824 | -0 | 0 | -0 | 0 |
| | 4 | 10 | 98.84 | 94.94 | 94.88 | 0.06 | 1449 | 406 | 333 | 383 | 1855 | 1842 | 1832 | 13 | 23 | 3 | 6 |
| | 6 | 9 | 98.85 | 94.99 | 94.90 | 0.09 | 1451 | 383 | 355 | 352 | 1834 | 1806 | 1803 | 28 | 31 | 7 | 8 |
| | 7 | 7 | 98.85 | 94.99 | 94.92 | 0.07 | 1454 | 298 | 281 | 279 | 1752 | 1735 | 1733 | 17 | 19 | 6 | 6 |
| | 12 | 6 | 98.88 | 95.23 | 95.03 | 0.2 | 1455 | 315 | 272 | 266 | 1770 | 1727 | 1721 | 43 | 49 | 14 | 18 |
| 19950505 | 18 | 6 | 98.92 | 95.37 | 95.20 | 0.17 | 1456 | 352 | 277 | 308 | 1808 | 1733 | 1764 | 75 | 44 | 21 | 12 |
| | 25 | 6 | 98.97 | 95.57 | 95.43 | 0.14 | 1458 | 407 | 323 | 389 | 1865 | 1781 | 1827 | 84 | 38 | 21 | 9 |
| | 26 | 5 | 98.98 | 95.57 | 95.47 | 0.1 | 1458 | 339 | 324 | 318 | 1797 | 1782 | 1774 | 15 | 23 | 4 | 7 |
| | 27 | 3 | 98.99 | 95.70 | 95.55 | 0.15 | 1456 | 222 | 196 | 201 | 1678 | 1652 | 1657 | 26 | 21 | 12 | 10 |
| | 31 | 2 | 99.01 | 95.99 | 95.84 | 0.15 | 1456 | 177 | 141 | 161 | 1633 | 1597 | 1617 | 36 | 16 | 20 | 9 |
| 19950506 | 38 | 2 | 99.06 | 96.43 | 96.35 | 0.08 | 1456 | 223 | 173 | 214 | 1679 | 1629 | 1870 | 50 | 9 | 22 | 4 |
| | 48 | 2 | 99.13 | 96.89 | 96.93 | -0.04 | 1473 | 279 | 230 | 285 | 1752 | 1703 | 1758 | 49 | -6 | 18 | -2 |
| | 59 | 2 | 99.21 | 97.29 | 97.37 | -0.08 | 1483 | 333 | 302 | 344 | 1816 | 1785 | 1827 | 31 | -11 | 9 | -3 |
| | 72 | 1 | 99.30 | 97.86 | 97.83 | 0.03 | 1491 | 208 | 192 | 206 | 1699 | 1673 | 1697 | 26 | 2 | 13 | 1 |

cas #12

| Date | temps | nb Van | LSJ | IMmes | IMsim | diff niv | Qtur mes | Qdev mes | Qdev sim | Qdev sim | Qtotmes | Qtotsim | Qtotsim | diff Q | diff Qcalc | %erreur | %erreur |
|----------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|------------|---------|---------|
| | h | | m | m | m | m | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | m3/s | | |
| 19970502 | 0 | 11 | 98.78 | 95.11 | 95.10 | 0.01 | 1395 | 518 | 518 | 518 | 1913 | 1913 | 1913 | 0 | -0 | 0 | -0 |
| | 4 | 11 | 98.81 | 95.11 | 95.15 | -0.04 | 1395 | 522 | 520 | 541 | 1917 | 1915 | 1936 | 2 | -19 | 0 | -4 |
| | 5 | 10 | 98.81 | 95.14 | 95.17 | -0.03 | 1404 | 487 | 433 | 501 | 1891 | 1897 | 1905 | -8 | -14 | -1 | -3 |
| | 6 | 9 | 98.82 | 95.18 | 95.20 | -0.02 | 1408 | 454 | 432 | 462 | 1862 | 1860 | 1870 | 2 | -8 | 0 | -2 |
| | 8 | 7 | 98.83 | 95.28 | 95.26 | 0.02 | 1425 | 383 | 370 | 378 | 1808 | 1795 | 1803 | 13 | 5 | 3 | 1 |
| 19970503 | 9 | 6 | 98.84 | 95.37 | 95.31 | 0.06 | 1426 | 352 | 313 | 337 | 1778 | 1759 | 1783 | 19 | 15 | 5 | 4 |
| | 16 | 5 | 98.87 | 95.71 | 95.65 | 0.06 | 1415 | 372 | 297 | 358 | 1787 | 1712 | 1773 | 75 | 14 | 20 | 4 |
| | 24 | 3 125 | 98.93 | 96.27 | 96.11 | 0.16 | 1429 | 362 | 310 | 334 | 1791 | 1739 | 1763 | 52 | 28 | 14 | 8 |
| | 33 | 3 125 | 98.99 | 96.50 | 96.60 | -0.1 | 1444 | 402 | 347 | 422 | 1846 | 1801 | 1866 | 45 | -20 | 11 | -5 |
| | 39 | 3 125 | 99.03 | 96.74 | 96.90 | -0.16 | 1453 | 449 | 416 | 481 | 1802 | 1889 | 1934 | 13 | -32 | 3 | -7 |
| 19970504 | 40 | 3 | 99.03 | 96.79 | 96.97 | -0.18 | 1457 | 400 | 412 | 435 | 1857 | 1889 | 1892 | -32 | -36 | -8 | -9 |
| | 41 | 2 | 99.04 | 96.79 | 97.01 | -0.22 | 1469 | 268 | 414 | 295 | 1735 | 1903 | 1764 | -168 | -29 | -63 | -11 |
| | 48 | 1 29 125 | 99.11 | 96.95 | 97.34 | -0.39 | 1467 | 268 | 298 | 305 | 1735 | 1765 | 1772 | -20 | -37 | -7 | -14 |
| | 59 | 1 29 125 | 99.20 | 97.69 | 97.59 | 0.1 | 1469 | 338 | 318 | 329 | 1807 | 1787 | 1798 | 20 | 9 | 6 | 3 |
| | 69 | 1 29 125 | 99.24 | 97.93 | 97.71 | 0.22 | 1470 | 362 | 318 | 340 | 1832 | 1808 | 1810 | 24 | 22 | 7 | 6 |

Cas d'ouverture (perte de charge importante)

cas #1

| Date | temps | nb Van | LSJ | IMmes | IMsim | diff niv | Qtur mes | Qdev mes | Qdev s m | Qdev sim | Qtotmes | Qtotsim | Qtotaim | diff Q | dt Ocas | %erreur | %erreur |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| | h | | m | m | m | | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | % | % |
| 19940506 | 0 | 1 | 98.15 | 94.02 | 94.02 | 0 | 1425 | 11 | 11 | 11 | 1436 | 1436 | 1436 | 0 | -0 | 0 | -4 |
| | 2 | 2 | 98.18 | 94.04 | 94.02 | 0.02 | 1420 | 24 | 23 | 23 | 1444 | 1443 | 1443 | 1 | 1 | 4 | 5 |
| | 3 | 3 | 98.17 | 94.05 | 94.02 | 0.03 | 1424 | 36 | 34 | 34 | 1460 | 1458 | 1458 | 2 | 2 | 6 | 5 |
| | 4 | 4 | 98.17 | 94.04 | 94.02 | 0.02 | 1421 | 48 | 46 | 46 | 1469 | 1467 | 1467 | 2 | 2 | 4 | 5 |
| | 5 | 6 | 98.18 | 94.05 | 94.02 | 0.03 | 1421 | 73 | 69 | 69 | 1494 | 1490 | 1490 | 4 | 4 | 5 | 6 |
| | 7 | 7 | 98.19 | 94.07 | 94.02 | 0.05 | 1424 | 89 | 80 | 80 | 1513 | 1504 | 1504 | 9 | 9 | 10 | 10 |
| | 8 | 8 | 98.19 | 94.07 | 94.02 | 0.05 | 1426 | 102 | 91 | 91 | 1528 | 1517 | 1517 | 11 | 11 | 11 | 10 |
| | 10 | 10 | 98.2 | 94.06 | 94.02 | 0.04 | 1427 | 124 | 114 | 114 | 1551 | 1541 | 1541 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| | 15 | 11 | 98.23 | 94.02 | 94.02 | 0 | 1431 | 125 | 128 | 128 | 1558 | 1557 | 1557 | -1 | -1 | -1 | -0 |
| 19940507 | 25 | 11 | 98.29 | 94.02 | 94.09 | -0.07 | 1433 | 125 | 127 | 148 | 1558 | 1560 | 1579 | -2 | -21 | -2 | -17 |
| | 36 | 11 | 98.38 | 94.07 | 94.19 | -0.12 | 1426 | 140 | 148 | 177 | 1568 | 1574 | 1603 | -8 | -37 | -8 | -27 |
| 19940508 | 47 | 11 | 98.45 | 94.23 | 94.31 | -0.08 | 1434 | 189 | 179 | 216 | 1623 | 1613 | 1650 | 10 | -27 | 5 | -14 |
| | 57 | 11 | 98.54 | 94.33 | 94.42 | -0.09 | 1425 | 221 | 218 | 252 | 1646 | 1643 | 1677 | 3 | -31 | 1 | -14 |
| 19940509 | 72 | 11 | 98.67 | 94.6 | 94.72 | -0.12 | 1425 | 313 | 259 | 358 | 1738 | 1684 | 1783 | 54 | -45 | 17 | -14 |

cas #11

| Date | temps | nb Van | LSJ | IMmes | IMsim | diff niv | Qtur mes | Qdev mes | Qdev s m | Qdev sim | Qtotmes | Qtotsim | Qtotaim | diff Q | dt Ocas | %erreur | %erreur |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| | h | | m | m | m | | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | % | % |
| 19970426 | 0 | 2 | 97.97 | 93.92 | 93.92 | 0 | 1393 | 18 | 18 | 18 | 1411 | 1411 | 1411 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 5 | 2 | 98.02 | 93.95 | 93.92 | 0.03 | 1399 | 19 | 18 | 18 | 1418 | 1417 | 1417 | 1 | 1 | 5 | 6 |
| | 10 | 3 | 98.05 | 93.94 | 93.92 | 0.02 | 1390 | 19 | 18 | 18 | 1409 | 1408 | 1408 | 1 | 1 | 5 | 6 |
| | 11 | 4 | 98.05 | 93.94 | 93.92 | 0.02 | 1385 | 28 | 27 | 27 | 1413 | 1412 | 1412 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| | 12 | 5 | 98.06 | 93.95 | 93.93 | 0.02 | 1361 | 38 | 33 | 37 | 1399 | 1397 | 1398 | 2 | 1 | 5 | 3 |
| | 20 | 7 | 98.11 | 94.03 | 94.02 | 0.01 | 1349 | 58 | 45 | 57 | 1407 | 1395 | 1406 | 12 | 1 | 21 | 2 |
| | 21 | 8 | 98.11 | 94.03 | 94.03 | 0 | 1358 | 81 | 80 | 82 | 1437 | 1436 | 1438 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 19970427 | 22 | 9 | 98.12 | 94.07 | 94.04 | 0.03 | 1373 | 102 | 94 | 96 | 1475 | 1467 | 1469 | 8 | 6 | 8 | 6 |
| | 28 | 9 | 98.12 | 94.09 | 94.1 | -0.01 | 1385 | 119 | 103 | 122 | 1504 | 1493 | 1507 | 11 | -3 | 9 | -3 |
| | 35 | 10 | 98.15 | 94.14 | 94.16 | -0.02 | 1380 | 132 | 123 | 137 | 1512 | 1503 | 1517 | 9 | -5 | 7 | -4 |
| | 36 | 11 | 98.16 | 94.14 | 94.17 | -0.03 | 1376 | 161 | 153 | 155 | 1537 | 1529 | 1531 | 8 | 6 | 5 | 3 |
| | 41 | 11 | 98.18 | 94.16 | 94.22 | -0.06 | 1376 | 167 | 172 | 187 | 1543 | 1548 | 1563 | -5 | -20 | -3 | -12 |
| 19970428 | 48 | 11 | 98.21 | 94.2 | 94.28 | -0.08 | 1386 | 180 | 183 | 206 | 1566 | 1554 | 1592 | 12 | -26 | 7 | -14 |
| | 55 | 11 | 98.27 | 94.24 | 94.37 | -0.13 | 1375 | 192 | 203 | 235 | 1567 | 1563 | 1610 | -16 | -43 | -8 | -23 |
| | 65 | 11 | 98.34 | 94.34 | 94.48 | -0.14 | 1362 | 225 | 230 | 272 | 1587 | 1600 | 1634 | -13 | -47 | -6 | -21 |
| 19970429 | 73 | 11 | 98.39 | 94.39 | 94.58 | -0.19 | 1370 | 268 | 274 | 306 | 1638 | 1644 | 1676 | -6 | -38 | -2 | -14 |

Cas d'ouverture (perte de charge petite)

cas #3

| Date | temps | nb Van | LSJ | IMmes | IMsim | diff niv | Qtur mes | Qdev mes | Qdev sim | Qdev sim | Qtotmes | Qtotsim | Qtotsim | diff Q | dr Ocac | %erreur | %erreur |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| | h | | m | m | m | | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | | |
| 19940513 | 0 | | 99.56 | 98.56 | 98.34 | 0.22 | 1515 | 528 | 518 | 492 | 2043 | 2033 | 2007 | 10 | 38 | 2 | 7 |
| | 1 | 3 | 99.57 | 98.56 | 98.29 | 0.27 | 1527 | 792 | 734 | 725 | 2319 | 2261 | 2252 | 58 | 67 | 7 | 8 |
| | 2 | 4 | 99.58 | 98.45 | 98.23 | 0.22 | 1490 | 1019 | 950 | 948 | 2509 | 2450 | 2438 | 59 | 71 | 6 | 7 |
| | 3 | 6 | 99.59 | 98.26 | 98.12 | 0.14 | 1483 | 1435 | 1403 | 1369 | 2898 | 2866 | 2832 | 32 | 66 | 2 | 5 |
| | 4 | 7 | 99.6 | 98.1 | 98.01 | 0.09 | 1444 | 1585 | 1576 | 1538 | 3029 | 3020 | 2980 | 9 | 49 | 1 | 3 |
| | 6 | 8 | 99.62 | 97.77 | 97.79 | -0.02 | 1490 | 1608 | 1717 | 1821 | 3098 | 3207 | 3111 | -109 | -13 | -7 | -1 |
| | 7 | 9 | 99.62 | 97.52 | 97.68 | -0.16 | 1490 | 1644 | 1800 | 1750 | 3134 | 3290 | 3240 | -156 | -106 | -9 | -6 |
| | 10 | 11 | 99.64 | 97.07 | 97.33 | -0.28 | 1475 | 1866 | 2033 | 1862 | 3141 | 3538 | 3337 | -397 | -196 | -24 | -12 |
| 19940513 | 13 | 11 | 99.66 | 96.74 | 97.08 | -0.34 | 1490 | 1431 | 1817 | 1874 | 2921 | 3307 | 3164 | -386 | -243 | -27 | -17 |

cas #13

| Date | temps | nb Van | LSJ | IMmes | IMsim | diff niv | Qtur mes | Qdev mes | Qdev sim | Qdev sim | Qtotmes | Qtotsim | Qtotsim | diff Q | dr Ocac | %erreur | %erreur |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| | h | | m | m | m | | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | | |
| 19970507 | 0 | 0.14 | 99.60 | 98.67 | 98.68 | 0.19 | 1490 | 11 | 11 | 11 | 1501 | 1501 | 1501 | 0 | -0 | 0 | -1 |
| | 6 | 188 | 99.68 | 98.98 | 98.68 | 0.32 | 1444 | 143 | 138 | 138 | 1587 | 1582 | 1580 | 6 | 7 | 3 | 5 |
| | 7 | 2 | 99.67 | 98.98 | 98.59 | 0.39 | 1442 | 744 | 677 | 668 | 2186 | 2119 | 2110 | 67 | 76 | 9 | 10 |
| | 9 | 3 | 99.64 | 98.72 | 98.44 | 0.28 | 1480 | 972 | 923 | 896 | 2432 | 2383 | 2355 | 49 | 77 | 5 | 8 |
| | 10 | 4 | 99.64 | 98.57 | 98.34 | 0.23 | 1419 | 1196 | 1139 | 1114 | 2615 | 2558 | 2533 | 57 | 82 | 5 | 7 |
| | 11 | 6 | 99.65 | 98.44 | 98.23 | 0.21 | 1397 | 1624 | 1435 | 1422 | 2821 | 2852 | 2819 | 69 | 102 | 5 | 7 |
| | 12 | 8 | 99.65 | 98.12 | 98.09 | 0.03 | 1375 | 1824 | 1832 | 1808 | 3199 | 3237 | 3181 | -38 | 18 | -2 | 1 |
| | 13 | 10 | 99.65 | 98 | 97.92 | 0.08 | 1420 | 2186 | 2211 | 2125 | 3606 | 3631 | 3545 | -25 | 81 | -1 | 3 |
| | 18 | 11 | 99.65 | 97.45 | 97.35 | 0.1 | 1429 | 1954 | 2216 | 1878 | 3383 | 3845 | 3307 | -262 | 76 | -13 | 4 |
| | 21 | 11 | 99.66 | 97.15 | 97.13 | 0.02 | 1429 | 1725 | 1838 | 1711 | 3154 | 3267 | 3140 | -113 | 14 | -7 | 1 |
| | 23 | 11 | 99.67 | 96.95 | 97.01 | -0.06 | 1482 | 1579 | 1838 | 1823 | 3061 | 3170 | 3105 | -109 | -44 | -7 | -3 |
| 19970508 | 25 | 11 | 99.68 | 96.85 | 96.84 | -0.09 | 1390 | 1508 | 1637 | 1573 | 2898 | 2997 | 2963 | -99 | -65 | -7 | -4 |
| | 27 | 11 | 99.69 | 96.72 | 96.68 | -0.14 | 1390 | 1417 | 1538 | 1516 | 2807 | 2948 | 2908 | -141 | -99 | -10 | -7 |
| | 34 | 11 | 99.7 | 96.62 | 96.72 | -0.1 | 1385 | 1349 | 1432 | 1418 | 2734 | 2877 | 2803 | -143 | -69 | -11 | -5 |
| | 42 | 11 | 99.78 | 96.56 | 96.63 | -0.07 | 1410 | 1309 | 1435 | 1357 | 2719 | 2815 | 2767 | -96 | -48 | -7 | -4 |
| 19970509 | 50 | 11 | 99.78 | 96.57 | 96.63 | -0.06 | 1415 | 1315 | 1333 | 1357 | 2730 | 2768 | 2772 | -38 | -42 | -3 | -3 |
| | 62 | 11 | 99.79 | 96.57 | 96.63 | -0.06 | 1400 | 1315 | 1333 | 1357 | 2715 | 2753 | 2757 | -38 | -42 | -3 | -3 |
| 19970510 | 72 | 11 | 99.81 | 96.62 | 96.63 | -0.01 | 1400 | 1349 | 1332 | 1357 | 2749 | 2752 | 2757 | -3 | -8 | -0 | -1 |